

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti



Návrh a pevnostní analýza zásobníku

Design and Stress Analysis of Container

Student: Filip Adámek

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Sedlák

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

Zadání bakalářské práce

Student:

Filip Adámek

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Návrh a pevnostní analýza zásobníku
Design and Stress Analysis of Container

Zásady pro vypracování:

Zkoumaným technickým objektem je zásobník. Technickým problémem je provedení návrhu stojných nohou a tloušťky pláště nádoby.

Postup řešení:

- stanovení podstatných vlastností zásobníku z hlediska řešeného problému,
- návrh stojných nohou,
- návrh tloušťek pláště,
- sestavení výpočtového modelu,
- provedení numerické simulace,
- vyhodnocení výsledků.

Examined technical problem is container. The main aim is the project base and thickness of the shell.

The solving process:

- Determination of container properties in terms of the problem
- Base proposal
- Wall thickness of the shell proposal
- Creation of FE model
- Realization of FE simulations
- Evaluation of results

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Technická dokumentace zásobníku
- [2] Němec, J., Dvořák J., Hoschl, C. Pružnost a pevnost ve strojírenství, Technický průvodce 69, SNTL, Praha 1989
- [3] Lenert, J., Pružnost a pevnost II, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1998
- [4] Janíček, P., Ondráček, J., Vrbka' J. Mechanika těles - pružnost a pevnost I., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno, 1987
- [5] Ondráček, J', Vrbka' J., Janíček, P' Mechanika těles - pružnost a pevnost II., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno, 1988
- [6] Lenert, J., Úvod do metody konečných prvků, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1999

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Josef Sedlák**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Tímto chci poděkovat panu Ing. Josefovi Sedlákoví a kolektivu doktorandů katedry 339, Pružnost a pevnost VŠB TU – Ostrava. Díky jejich pomoci, radám a doporučení výrazně přispěli ke vzniku této práce. Dále bych chtěl poděkovat kolektivu společnosti m-tec CZ, s.r.o. za poskytnutí podkladů k vytvoření této práce.

Filip Adámek

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20.5.2013

Filip Adámek
podpis studenta

Prohlašuji, že

- ✓ byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- ✓ beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- ✓ souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- ✓ bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- ✓ bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- ✓ beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2013

Filip Adámek

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Filip Adámek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Výškovická 2564/74, Ostrava – Zábřeh, 700 30

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Filip Adámek, *Návrh a pevnostní analýza zásobníku*. Ostrava: Katedra pružnosti a pevnosti – 339, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Sedlák.

Bakalářská práce se zabývá návrhem tloušťky pláště zásobníku. Dalším zájmem práce byl konstrukční návrh stojných nohou zásobníku. K návrhu tloušťek byla využita analytická metoda a počítačové modelování, konkrétně metoda konečných prvků. Při návrhu tloušťek pláště byly porovnány dva případy uložení se skutečným uložením pláště. Ke konstrukčnímu návrhu stojných nohou byla využita jen metoda konečných prvků. Při konstrukčním návrhu stojných nohou byly provedeny dvě varianty. U každé z těchto variant byly provedeny pevnostní výpočty.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Filip Adámek, *Design and Stress Analysis of Container*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics of Materials - 339, 2013. Supervisor: Ing. Josef Sedlák.

This bachelor thesis deals with proposing of thickness of container's shell. Next interest of this bachelor thesis is designing construction of supports. For designing of thickness were used analytic method and computer modelling, especially the Finite Element Method. In proposing of thickness were compared two cases of placement with the real placement of shell. For designing construction of supports was used only Finite Element Method. In designing construction of supports have been done two alternatives. In each of those alternatives have been done FEM simulations.

Obsah

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek.....	5
Seznam grafů	5
Seznam použitého značení.....	6
1. ÚVOD	7
2. POPIS ŘEŠENÉHO PROBLÉMU.....	8
3. ŘEŠENÍ TECHNICKÉHO PROBLÉMU – NÁVRH TLOUŠTĚK ZÁSObNÍKU	10
3.1. První varianta uložení válcové části pláště zásobníku	13
3.1.1. Odvození rovnic pro výpočet	13
3.1.2. Získané výsledky	16
3.2. Druhá varianta uložení válcové části pláště zásobníku.....	17
3.2.1. Odvození rovnic pro výpočet	18
3.2.2. Získané výsledky	19
3.3. Dílčí závěr a zhodnocení.....	20
4. ŘEŠENÍ TECHNICKÉHO PROBLÉMU – POROVNÁNÍ NÁVRHU TLOUŠTĚK SE SKUTEČNÝM ULOŽENÍM	21
4.1. První varianta uložení válcové části pláště zásobníku	22
4.1.1. Grafy	23
4.2. Druhá varianta uložení válcové části pláště zásobníku.....	25
4.2.1. Grafy	25

4.3. Skutečné uložení válcové části pláště zásobníku.....	27
4.3.1. Výpočtový model	28
4.3.1.1. Symetrie	28
4.3.2. Síť.....	29
4.3.3. Okrajové podmínky.....	32
4.3.4. Získané výsledky	34
4.4. Dílčí závěr a zhodnocení.....	37
 5. ŘEŠENÍ TECHNICKÉHO PROBLÉMU – NÁVRH STOJNÝCH NOHOU.....	 39
5.1. Konstrukční varianta A.....	41
5.1.1. Výpočtový model	43
5.1.1.1. Symetrie	43
5.1.2. Síť.....	44
5.1.3. Okrajové podmínky.....	46
5.1.4. Získané výsledky	48
5.1.5. Dílčí závěr a zhodnocení	53
5.2. Konstrukční varianta B.....	54
5.2.1. Výpočtový model	55
5.2.1.1. Symetrie	56
5.2.2. Síť.....	57
5.2.3. Okrajové podmínky.....	58
5.2.4. Získané výsledky	59
5.2.5. Dílčí závěr a zhodnocení	64
 6. ZÁVĚR.....	 65
 7. CITOVANÁ LITERATURA	 66

Seznam obrázků

Obr. 1 Mobilní zásobník	7
Obr. 2 Schéma zásobníku	9
Obr. 3 Element tenkostěnné nádoby [4]	11
Obr. 4 Problém sférického dna	12
Obr. 5 Schéma řešení tenkostěnné nádoby	12
Obr. 6 Typy uložení (zleva) – 1. varianta, 2. varianta, skutečné uložení	13
Obr. 7 Výpočtové schéma první varianty uložení válcové části pláště	14
Obr. 8 Nadzemní zahradní bazén [5]	17
Obr. 9 Výpočtové schéma druhé varianty uložení válcové části pláště.....	18
Obr. 10 Zvolené tloušťky zásobníku s uvážením možných vlivů	21
Obr. 11 Importovaná geometrie konstrukční varianty B do výpočtového softwaru	28
Obr. 12 Vzniklá geometrie po využití rovinné symetrie	29
Obr. 13 Geometrie prvku SHELL181 [8].....	30
Obr. 14 Síť vytvořená na válcové části pláště zásobníku	31
Obr. 15 Geometrické okrajové podmínky	32
Obr. 16 Strukturální okrajová podmínka – hydrostatický tlak p [MPa]	33
Obr. 17 Meridiánové napětí σ_m [MPa] ve válcové části pláště zásobníku	34
Obr. 18 Obvodové napětí σ_t [MPa] ve válcové části pláště zásobníku	35
Obr. 19 Redukované napětí σ_{RHHH} [MPa] ve válcové části pláště zásobníku.....	36
Obr. 20 Zásobník se šikmými stojnými nohami [9]	40
Obr. 21 Zásobník s rovnými stojnými nohami [10].....	40
Obr. 22 Schéma s kótami konstrukční varianty A (pohled zepředu).....	41
Obr. 23 Schéma podstavy s kótami konstrukční varianty A (pohled shora z částečného řezu)	42
Obr. 24 Importovaná geometrie do výpočtového softwaru (konstrukční varianta A).....	43
Obr. 25 Vzniklá geometrie při využití rovinné symetrie (konstrukční varianta A).....	44
Obr. 26 Síť vytvořená na sférickém dně, stojně a podstavě (konstrukční varianta A).....	45
Obr. 27 Geometrické okrajové podmínky (konstrukční varianta A)	46
Obr. 28 Strukturální okrajová podmínka – hydrostatický tlak p [MPa] (konstrukční varianta A)	47

Obr. 29 Redukované napětí σ_{RHHM} [MPa] v místě sférického dna, stojiny a podstavy (konstrukční varianta A)	48
Obr. 30 Meridiánové napětí σ_m [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta A) ..	49
Obr. 31 Obvodové napětí σ_t [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta A)	50
Obr. 32 Posuv [mm] (konstrukční varianta A)	51
Obr. 33 Analýza redukovaného napětí σ_{RHHM} [MPa] v místě sférického dna, stojiny a podstavy (konstrukční varianta A)	52
Obr. 34 Schéma s kótami konstrukční varianty B (pohled zepředu)	54
Obr. 35 Schéma podstavy s kótami konstrukční varianty B (pohled shora z částečného řezu)	55
Obr. 36 Importovaná geometrie do výpočtového softwaru (konstrukční varianta B)	56
Obr. 37 Vzniklá geometrie při využití rovinné symetrie (konstrukční varianta B)	56
Obr. 38 Sít' vytvořená na sférickém dně, stojině a podstavě (konstrukční varianta B)	57
Obr. 39 Redukované napětí σ_{RHHM} [MPa] v místě sférického dna, stojiny a podstavy (konstrukční varianta B)	59
Obr. 40 Meridiánové napětí σ_m [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta B) ..	60
Obr. 41 Obvodové napětí σ_t [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta B)	61
Obr. 42 Posuv [mm] (konstrukční varianta B)	62
Obr. 43 Analýza redukovaného napětí σ_{RHHM} [MPa] v krycím plechu na podstavě	63

Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry materiálu zásobníku (ocel S235)	8
Tab. 2 Parametry hydrostatického tlaku	9
Tab. 3 Rozměry válcové části pláště zásobníku	16
Tab. 4 Vypočítané tloušťky pláště pro první variantu uložení válcové části pláště	16
Tab. 5 Vypočítané tloušťky pláště pro druhou variantu uložení válcové části pláště	20
Tab. 6 Skutečné hodnoty napětí ve válcové části pláště pro první variantu uložení	22
Tab. 7 Skutečné hodnoty napětí ve válcové části pláště pro druhou variantu uložení	25
Tab. 8 Porovnání meridiánového napětí σ_m [MPa]	37
Tab. 9 Porovnání obvodového napětí σ_t [MPa]	37
Tab. 10 Porovnání redukovaného napětí σ_{RHHM} [MPa]	37
Tab. 11 Porovnání skutečných bezpečností $k_{skutHHM}$ [-]	38

Seznam grafů

Graf 1 Rozložení hydrostatického tlaku p ve válcové části pláště zásobníku	23
Graf 2 Průběh skutečného meridiánového napětí σ_m a obvodového napětí σ_t u první varianty uložení válcové části pláště zásobníku	23
Graf 3 Průběh redukovaného napětí σ_{RHHM} podle hypotézy HHM u první varianty uložení válcové části pláště zásobníku	24
Graf 4 Průběh skutečného meridiánového napětí σ_m a obvodového napětí σ_t u druhé varianty uložení válcové části pláště zásobníku	26
Graf 5 Průběh redukovaného napětí σ_{RHHM} podle hypotézy HHM u druhé varianty uložení válcové části pláště zásobníku	26

Seznam použitého značení

Značka	Název veličiny	Jednotka
A	Tažnost	%
E	Modul pružnosti	MPa
F_p	Tlaková síla	N
$F_{\sigma m}$	Vnitřní síla	N
g	Gravitační konstanta	$m \cdot s^{-2}$
G_k	Tíhová síla od kapaliny	N
H	Výška pláště	mm
k	Zadaná bezpečnost	-
k_{skut}^{HMH}	Skutečná bezpečnost pláště	-
p	Hydrostatický tlak	MPa
R	Poloměr střednice pláště	mm
R_e	Mez kluzu	MPa
R_m	Mez pevnosti	MPa
R_M	Poloměr křivosti pláště meridiánový	mm
R_T	Poloměr křivosti pláště obvodový	mm
t	Tloušťka pláště nádoby	mm
t_{vyp}	Vypočítaná tloušťka pláště zásobníku	mm
y	Nezávislá proměnná	mm
μ	Poissonova konstanta	-
π	Ludolfovo číslo	-
ρ	Hustota kapaliny	$kg \cdot m^{-3}$
σ_{DOV}	Dovolené napětí	MPa
σ_m	Meridiánové napětí	MPa
σ_R^{HMH}	Redukované napětí dle hypotézy HMH	MPa
σ_t	Obvodové napětí	MPa

1. Úvod

Zásobník neboli silo je zařízení, které slouží k uskladnění převážně sypkých a kapalných materiálů. Nejčastěji se tato zařízení využívají v zemědělství pro uchování krmiva tzv. siláže. Dále se zásobníky využívají v průmyslu a ve stavebnictví pro uskladnění průmyslového materiálu a odpadu.

Nejčastějším materiálem využívajícím se pro výrobu zásobníků jsou oceli. Ve speciálních případech se používají i jiné materiály, například dřevo pro výrobu sudů, dále také beton. Zásobníky bývají zhotoveny v různých tvarech. Asi nejčastějším tvarem bývá válec. Není však výjimkou spatřit silo půlkulového tvaru či s obdélníkovým průřezem. Existují zásobníky, které bývají vysoké až přes sto metrů např. siláže. Tyto zásobníky však vzniknou spojením několika menších [1].

Zásobníky můžeme rozdělit na dva základní typy, na stacionární a na mobilní. Stacionární zásobníky jsou většinou velké zemědělské stavby. Mobilní zásobníky lze naplnit materiálem a dále je převážet. Je možno říci, že je to jakýsi typ kontejneru. Mobilní zásobníky bývají daleko menší než stacionární.



Obr. 1 Mobilní zásobník

2. Popis řešeného problému

Řešenou technickou soustavou byl mobilní zásobník na Obr. 2. Tento mobilní zásobník převážně slouží pro přepravu a uchování vody či průmyslového materiálu.

Uvedený mobilní zásobník se přepravuje ve vodorovné poloze. Tedy v takové poloze, kdy zásobník leží na nosičích. Pracovní stav, kdy zásobník slouží pouze pro uchování materiálu a není s ním manipulováno, je uskutečněn ve vertikální poloze.

Na výrobu všech částí daného zásobníku byla použita konstrukční ocel S235 (dle ČSN 11 375), která má dobrou svařitelnost všemi obvyklými způsoby. Tato ocel je dobře tvárná za tepla, avšak splňuje dobré mechanické vlastnosti až po následném normalizačním žíhání [2]. Parametry oceli využitého pro výrobu zásobníku jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Parametry materiálu zásobníku (ocel S235)

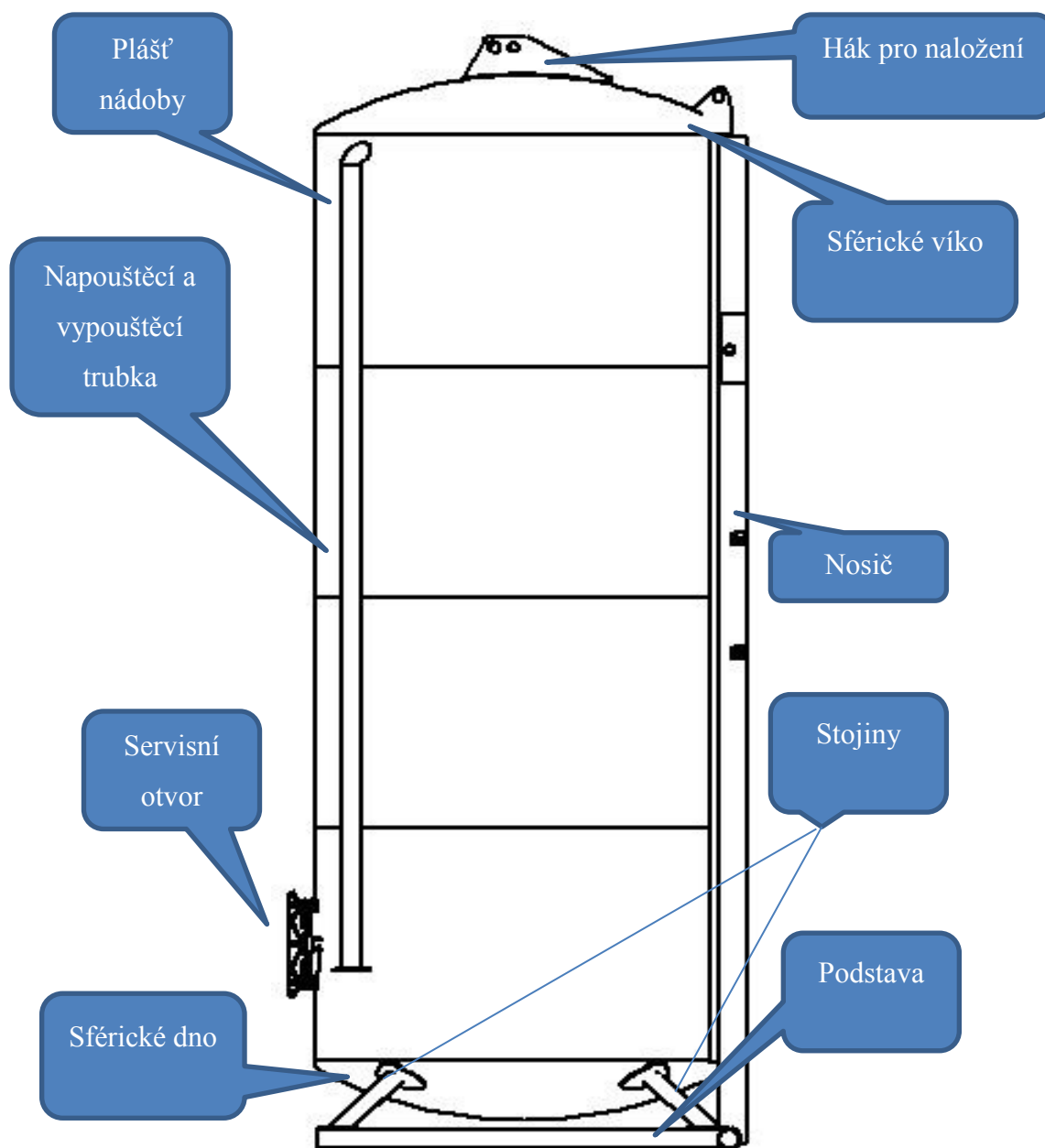
Mez kluzu R_e	235 MPa
Mez pevnosti R_m	360 MPa
Tažnost A	26 %
Poissonova konstanta μ	0,3
Modul pružnosti E	210 000 MPa

Tak jako při vývoji jiných technických zařízení vzniká i u zásobníku mnoho otázek. Toto zařízení musí splňovat určitá kritéria, aby byla zajištěna bezpečnost v provozu a nedošlo k ohrožení na životech lidí, kteří s takovým zařízením pracují. Jednou z takových otázek je správný návrh tloušťky pláště zásobníku. Je-li takový plášť moc tenký, může dojít při plném pracovním zatížení k havárii, což není přípustné. Na druhou stranu však ani není vhodné konstrukci předimenzovat z důvodu ekonomické únosnosti výroby. Muselo být vzato v úvahu, že výrobce chtěl ušetřit, a proto bylo třeba provést návrh tloušťky pláště zásobníku s přiměřenou bezpečností. Druhou otázkou byl návrh stojných nohou. Důležité bylo, aby nohy nebyly příliš složité na výrobu a aby byly schopny zvládnout zatížení při plném pracovním využití. To jsou dvě hlavní otázky, které byly řešeny.

Zásobník byl zatížen hydrostatickým tlakem s parametry viz. Tab. 2.

Tab. 2 Parametry hydrostatického tlaku

Gravitační zrychlení g	10 m.s^{-2}
Hustota kapaliny ρ	1000 kg.m^{-3}



Obr. 2 Schéma zásobníku

Veškeré analýzy byly provedeny v lineární oblasti, kde se materiál chová podle Hookeova zákona. V úvahu však nebyly brány mezní situace, jako jsou havárie, extrémní povětrnostní podmínky, atd.

Při řešení dané úlohy bylo použito nejprve analytické řešení, dále počítačové modelování s využitím numerických metod, konkrétně metoda konečných prvků (dále jen MKP).

Při analytickém řešení návrhu tloušťek umožnil charakter zásobníku využít teorii tenkostěnných nádob. Byla použita tzv. membránová teorie tenkostěnných nádob.

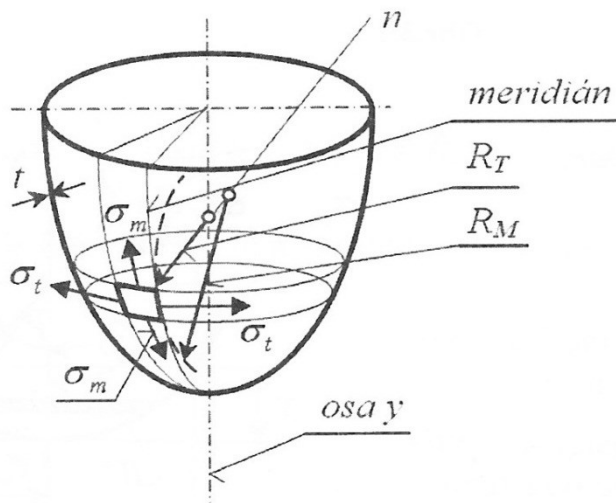
K provedení MKP analýzy (porovnání s analytickým řešením návrhu tloušťek a návrh stojných nohou) byl užit výpočtový software ANSYS Workbench Release 14, do jehož pracovního prostředí byl importován geometrický model vytvořený v CAD systému Autodesk Inventor Professional 2012. Tyto programy byly použity se souhlasem školy. Charakteristika zásobníku umožnila využít skořepinové prvky.

3. Řešení technického problému – návrh tloušťek zásobníku

Při návrhu tloušťky pláště zásobníku lze vycházet z analytického výpočtu s využitím teorie tenkostěnných nádob. Protože je zásobník rotačně symetrický a tloušťka stěny zanedbatelná vůči průměru, byla pro výpočet zvolena membránová teorie. Tato teorie nezahrnuje namáhání nádoby momentem. Tedy nelze řešit ztrátu stability tvaru při zatížení vnějším tlakem apod. [3].

Z podmínky rovnováhy prvku tenkostěnné rotační nádoby, ze které se vyjme element dvěma rovnoběžkovými a dvěma meridiánovými řezy dojdeme k Laplaceově rovnici (3.1), [4].

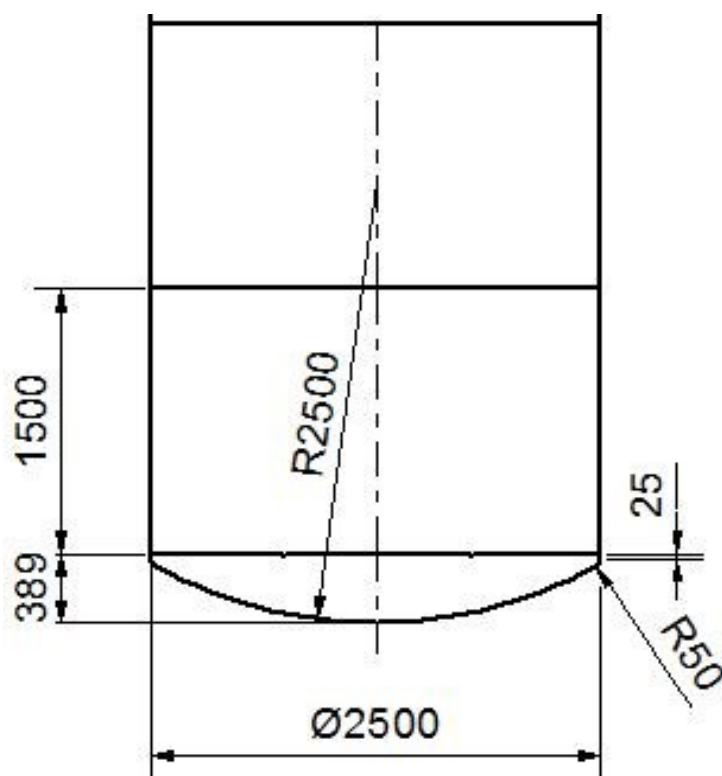
$$\frac{\sigma_m}{R_M} + \frac{\sigma_t}{R_T} = \frac{p}{t} \quad (3.1)$$



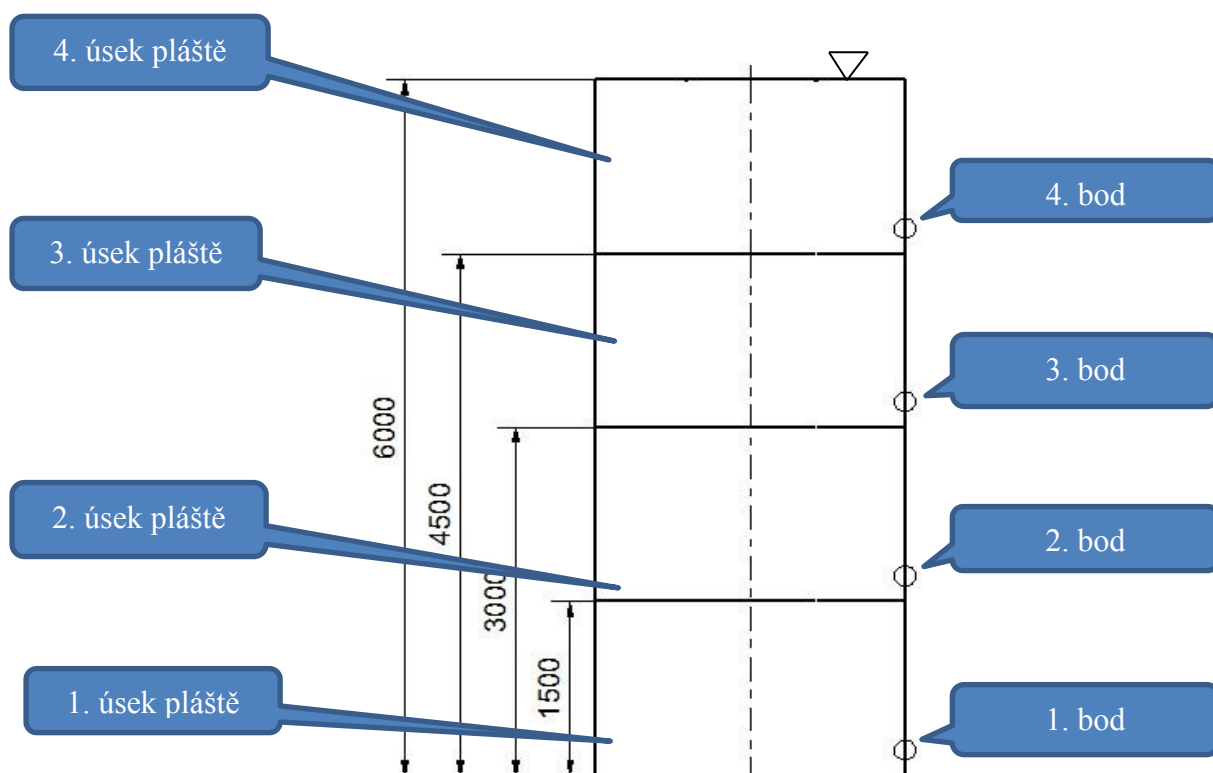
Obr. 3 Element tenkostěnné nádoby [4]

Protože plášť zásobníku není vyroben z jednoho celistvého plechu, ale je rozdělen na úseky navazující na sebe, napětí byla spočítána ve vyznačených bodech. V místech přechodů může dojít k přídavnému namáhání ohybem a smykem, proto zde nelze zaručit platnost membránové teorie. Každý úsek pláště má shodný vnitřní průměr a výšku, vyjímaje sférické části. Předpokladem bylo, že zásobník je naplněn do výšky čtvrtého úseku pláště (viz. Obr. 5).

Problém však nastává při určení tloušťky dna. Dno má sférický tvar a jak je zřejmé z Obr. 4, je zkonstruováno ze dvou poloměrů a velmi krátké rovné části. Jeden z těchto poloměrů je značně velký. Použití membránové teorie v případě výpočtu dna by bylo velmi složité. Proto byla řešena pouze válcová část pláště zásobníku. Tloušťka sférického dna bude upřesněna později.

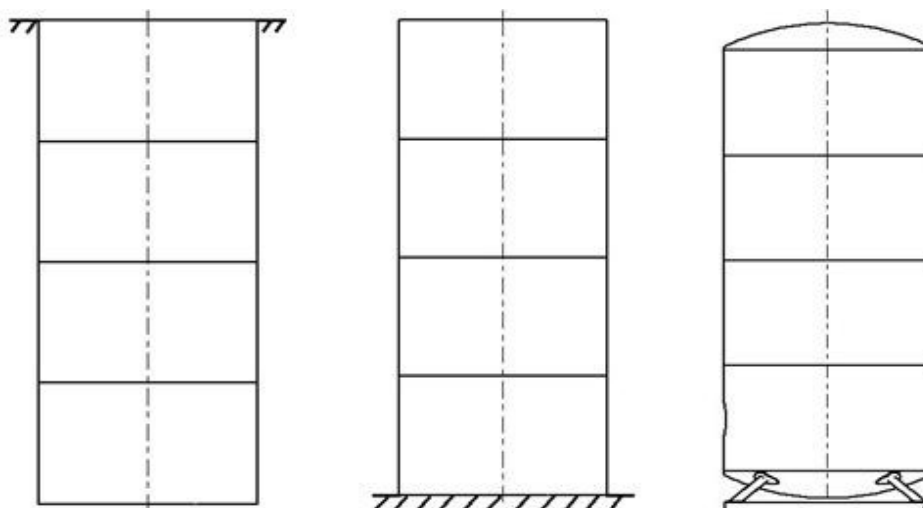


Obr. 4 Problém sférického dna



Obr. 5 Schéma řešení tenkostěnné nádoby

Pro výpočet byla použita membránová teorie. Avšak uložení pláště zásobníku by nejlépe popsala momentová teorie. Byly vypočítány tloušťky a napětí pro dva případy uložení válcové tenkostěnné nádoby (viz. Obr. 6). Následně byly výsledky obou uložení porovnány s MKP řešením (skutečným uložením).



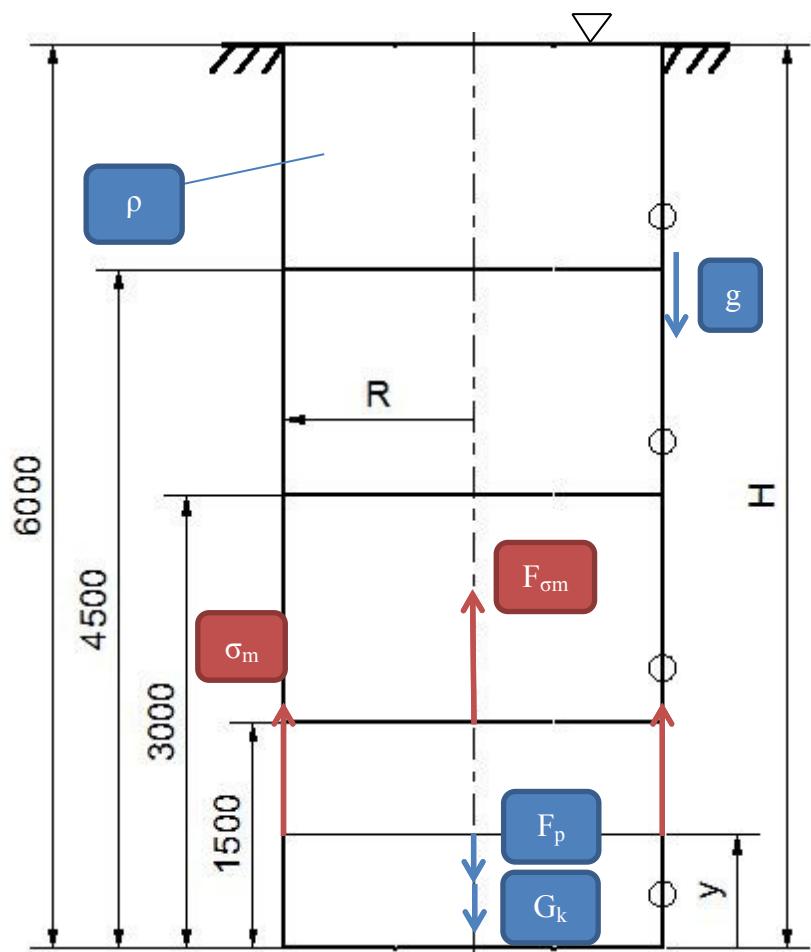
Obr. 6 Typy uložení (zleva) – 1. varianta, 2. varianta, skutečné uložení

3.1. První varianta uložení válcové části pláště zásobníku

První případ uložení válcové části pláště zásobníku je jednou z nejčastěji řešených úloh válcové tenkostěnné nádoby. Pokud je tato nádoba takto uložena, dochází v ní ke vzniku obvodového napětí σ_t a meridiánového napětí σ_m . Obvodové napětí je největší na dně nádoby a klesá lineárně s narůstající výškou vodního sloupce. Meridiánové napětí je konstantní po celé výšce takto naplněné nádoby. Nádoba je tedy namáhána tahem vlivem meridiánového napětí. Dále se také roztahuje do šířky vlivem obvodového napětí.

3.1.1. Odvození rovnic pro výpočet

Při odvození rovnic nebyla brána v úvahu vlastní tíha pláště. Nádoba byla naplněna po okraj vodou, tedy byla namáhána hydrostatickým tlakem p .



Obr. 7 Výpočtové schéma první varianty uložení válcové části pláště

Před sestavením rovnice rovnováhy bylo důležité uvědomit si, že poloměry křivosti pláště:

$$R_M = \infty \quad (3.2)$$

$$R_T = R \quad (3.3)$$

Rovnice popisující hydrostatický tlak ve směru řezu má tvar:

$$p = \varrho \cdot g \cdot (H - y) \quad (3.4)$$

Jelikož je $R_M = \infty$, z Laplaceovy rovnice (3.1) vyplývá, že:

$$\sigma_t = \frac{\varrho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R}{t} \quad (3.5)$$

Tlaková síla:

$$F_p = \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) \quad (3.6)$$

Vnitřní síla:

$$F_{\sigma m} = 2\pi \cdot R \cdot t \cdot \sigma_m \quad (3.7)$$

Tíhová síla od kapaliny:

$$G_k = \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot y \quad (3.8)$$

Sestavení rovnice rovnováhy:

$$F_{\sigma m} = F_p + G_k \quad (3.9)$$

Rovnice rovnováhy v rozepsaném tvaru:

$$2\pi \cdot R \cdot t \cdot \sigma_m = \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) + \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot y \quad (3.10)$$

Vyjádřené meridiánové napětí z rovnice rovnováhy:

$$\sigma_m = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot R}{2 \cdot t} = konst. \quad (3.11)$$

Před samotným získáním tvaru nerovnice pro tloušťku nádoby je ještě potřeba zjistit dovolené napětí z meze kluzu materiálu a zadané bezpečnosti ($k=1,5$), a to z rovnice níže.

$$\sigma_{DOV} = \frac{R_e}{k} \quad (3.12)$$

Z pevnostní podmínky byl následně zjištěn tvar nerovnice pro tloušťku válcové části pláště zásobníku u první varianty uložení. Ke stanovení redukovaného napětí byla použita hypotéza HMM.

Nerovnice jsou pak:

$$\sigma_R^{HMM} \leq \sigma_{DOV} \quad (3.13)$$

$$\sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_t^2 - \sigma_m \cdot \sigma_t} \leq \sigma_{DOV} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{t} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot R}{2}\right)^2 + [\rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R]^2 - \left[\frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot R}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R\right]} \leq \sigma_{DOV} \quad (3.15)$$

$$t \geq \frac{\sqrt{\left(\frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot R}{2}\right)^2 + [\rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R]^2 - \left[\frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot R}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R\right]}}{\sigma_{DOV}} \quad (3.16)$$

3.1.2. Získané výsledky

Dovolené napětí mělo hodnotu: $\sigma_{DOV} = 156,67 \text{ MPa}$

Parametry materiálu zásobníku a hydrostatického tlaku jsou uvedeny v Tab. 1 a Tab.

2. Rozměry pláště zásobníku nutné pro výpočet tloušťky jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Rozměry válcové části pláště zásobníku

Výška pláště H	6000 mm
Poloměr střednice pláště R	1250 mm

V Tab. 4 jsou vypočítány tloušťky válcové části pláště pro první variantu uložení.

Tab. 4 Vypočítané tloušťky pláště pro první variantu uložení válcové části pláště

Úsek pláště	Výška [mm]	t_{vyp} [mm]
1.	0	0,415
	500	0,381
	1000	0,348
	1500	0,320
2.	2000	0,288
	2500	0,261
	3000	0,239
3.	3500	0,222
	4000	0,211
	4500	0,207
4.	5000	0,211
	5500	0,222
	6000	0,239

3.2. Druhá varianta uložení válcové části pláště zásobníku

Druhá varianta uložení byla výpočtově jednodušší. Při takovém typu uložení, kdy nádoba stojí na dně, bylo uvažováno, že meridiánové napětí σ_m je velmi malé, takřka nulové. Od hydrostatického tlaku p působícího na dno nádoby nevzniká žádná reakce, která by působila na plášť nádoby. Nevznikají tedy tahová napětí ve směru osy rotace jako v prvním případě uložení. Jelikož nebyla uvážena vlastní tíha nádoby, nevznikají ani tlaková napětí v plášti. Nádoba je tedy namáhána pouze obvodovým napětím σ_t .

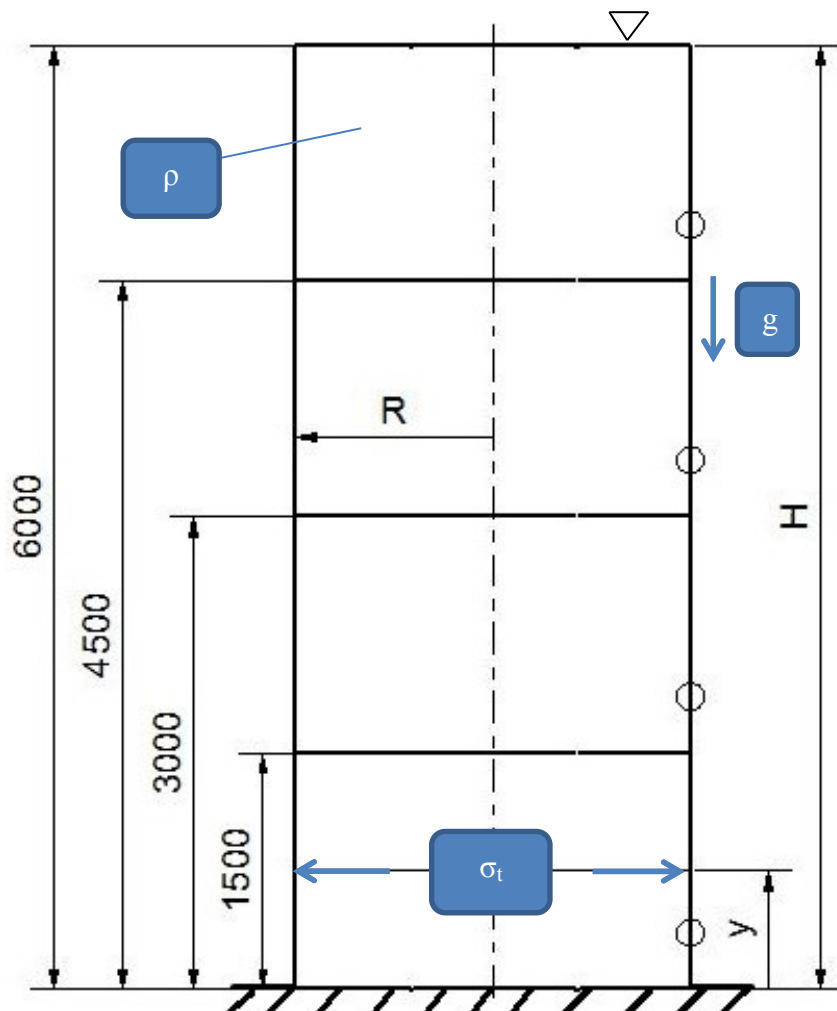
Tento poznatek je velmi využíván u dnešních nadzemních zahradních bazénů, kdy je pouze zajištěno utěsnění v místě styku s pevnou podložkou a pojištění proti nadměrné deformaci do stran.



Obr. 8 Nadzemní zahradní bazén [5]

3.2.1. Odvození rovnic pro výpočet

Při odvození rovnic nebyla brána v úvahu vlastní tíha pláště. Nádoba byla naplněna po okraj vodou, tedy byla namáhána hydrostatickým tlakem.



Obr. 9 Výpočtové schéma druhé varianty uložení válcové části pláště

Poloměry křivosti pláště jsou totožné s první variantou (viz. (3.2) a (3.3)).

Hydrostatický tlak:

$$p = \rho \cdot g \cdot (H - y) \quad (3.17)$$

Protože je $R_M = \infty$, z Laplaceovy rovnice vyplývá tvar obvodového napětí:

$$\sigma_t = \frac{\rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R}{t} \quad (3.18)$$

V úvodu kapitoly 3.2. bylo vysvětleno silové působení na plášť nádoby při druhém způsobu uložení, proto je meridiánové napětí:

$$\sigma_m = 0 = konst. \quad (3.19)$$

Z pevnostní podmínky byl následně zjištěn tvar nerovnice pro tloušťku válcové části pláště zásobníku u druhé varianty uložení. Redukované napětí bylo stanoveno z hypotézy HMM.

$$\sigma_R^{HMH} \leq \sigma_{DOV} \quad (3.20)$$

$$\sqrt{\sigma_t^2} \leq \sigma_{DOV} \quad (3.21)$$

$$\frac{1}{t} \cdot \sqrt{[\rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R]^2} \leq \sigma_{DOV} \quad (3.22)$$

$$t \geq \frac{\sqrt{[\rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R]^2}}{\sigma_{DOV}} \quad (3.23)$$

$$t \geq \frac{[\rho \cdot g \cdot (H - y) \cdot R]}{\sigma_{DOV}} \quad (3.24)$$

3.2.2. Získané výsledky

Hodnota dovoleného napětí viz. kapitola 3.1.2.

Parametry materiálu, ze kterého je zásobník zkonstruován jsou v Tab. 1. Parametry hydrostatického tlaku jsou uvedeny v a Tab. 2. Rozměry pláště zásobníku potřebné pro výpočet tloušťky jsou uvedeny v Tab. 3.

V následující tabulce jsou vypočítány tloušťky válcové části pláště pro druhou variantu uložení.

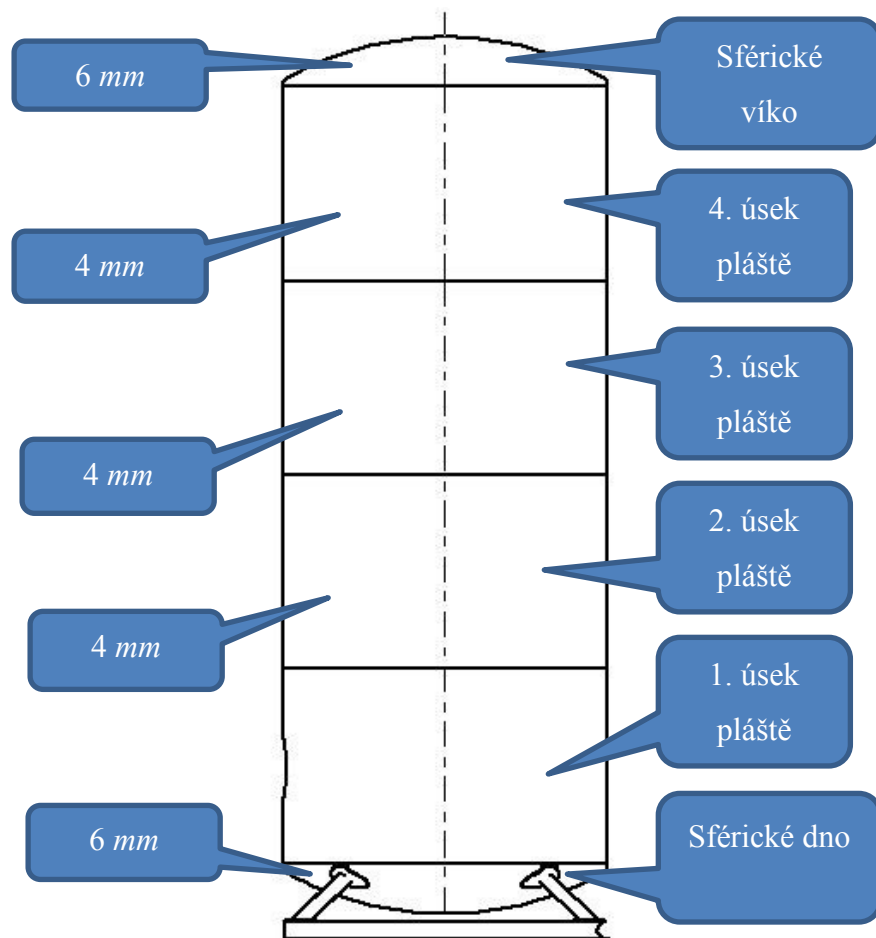
Tab. 5 Vypočítané tloušťky pláště pro druhou variantu uložení válcové části pláště

Úsek pláště	Výška [mm]	t_{vyp} [mm]
1.	0	0,479
	500	0,439
	1000	0,399
	1500	0,359
2.	2000	0,319
	2500	0,279
	3000	0,239
3.	3500	0,199
	4000	0,160
	4500	0,120
4.	5000	0,080
	5500	0,040
	6000	0

3.3. Dílčí závěr a zhodnocení

Z Tab. 4 a Tab. 5 vyplývá, že v místě, ve kterém působí největší hydrostatický tlak, byla vypočítána tloušťka stěny pláště pro obě varianty uložení 0,4 – 0,5 mm. Analytické výpočty pro obě varianty uložení válcové části pláště zásobníku ovšem nezahrnují další vlivy, jako např. extrémní pracovní podmínky, vliv vlastní tíhy pláště zásobníku, povětrnostní vlivy atd. Tyto další vlivy by výpočtovou tloušťku jistě zvětšily.

Z technologického a konstrukčního hlediska by bylo velmi složité vyrobit plášť zásobníku z plechu tenkého 0,4 – 0,5 mm. Standardně se válcované plechy zatepla vyrábějí přibližně od tloušťky 1,5 mm. Z důvodu přepravování abrazivního materiálu a nutnosti použití velmi náročné technologie výroby (vysoká obtížnost dodržení tolerance tloušťky), byla zvolena tloušťka válcové části pláště zásobníku 4 mm. Výrobní tolerance sférických částí jsou velké kvůli složitosti výroby, proto byla zvolena tloušťka 6 mm pro tyto části.



Obr. 10 Zvolené tloušťky zásobníku s uvážením možných vlivů

4. Řešení technického problému – porovnání návrhu tloušťek se skutečným uložením

V této kapitole byly porovnány hodnoty napětí a bezpečností obou variant uložení válcové části pláště zásobníku po zvolení tloušťky 4 mm se skutečným uložením. Tímto by se mělo dojít k závěru, zda navržené tloušťky byly dostačující.

K analýze skutečného uložení byla užita metoda MKP.

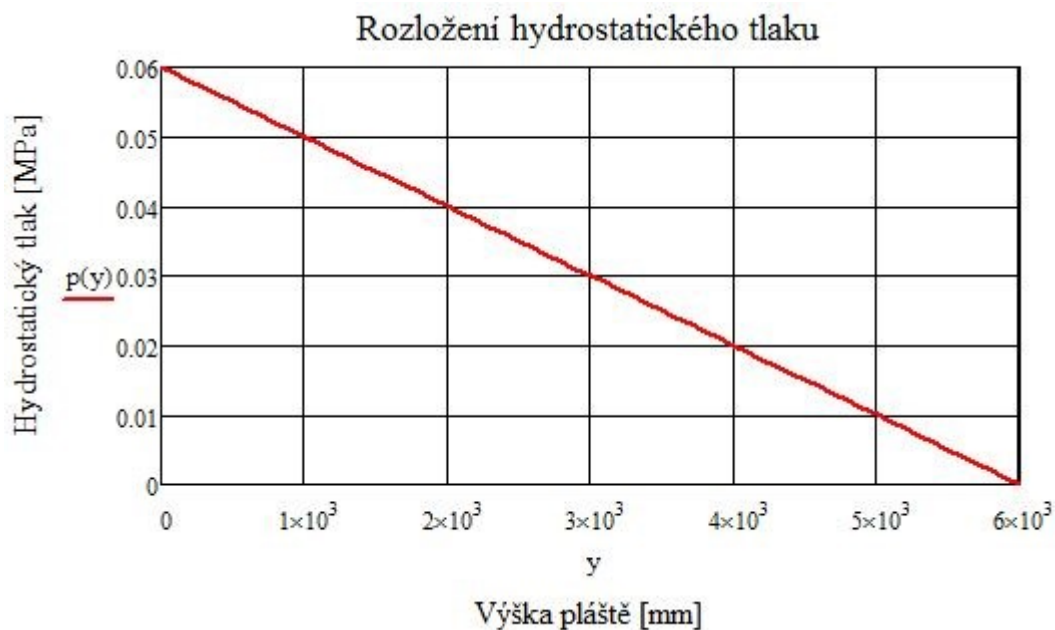
4.1. První varianta uložení válcové části pláště zásobníku

Na základě zvolené tloušťky 4 mm, která byla dosazena do získaných rovnic pro první variantu uložení válcové části pláště zásobníku, byly vypočteny skutečné hodnoty meridiánového σ_m a obvodového σ_t napětí v jednotlivých výškách této části pláště, a to z rovnic (3.5) a (3.11).

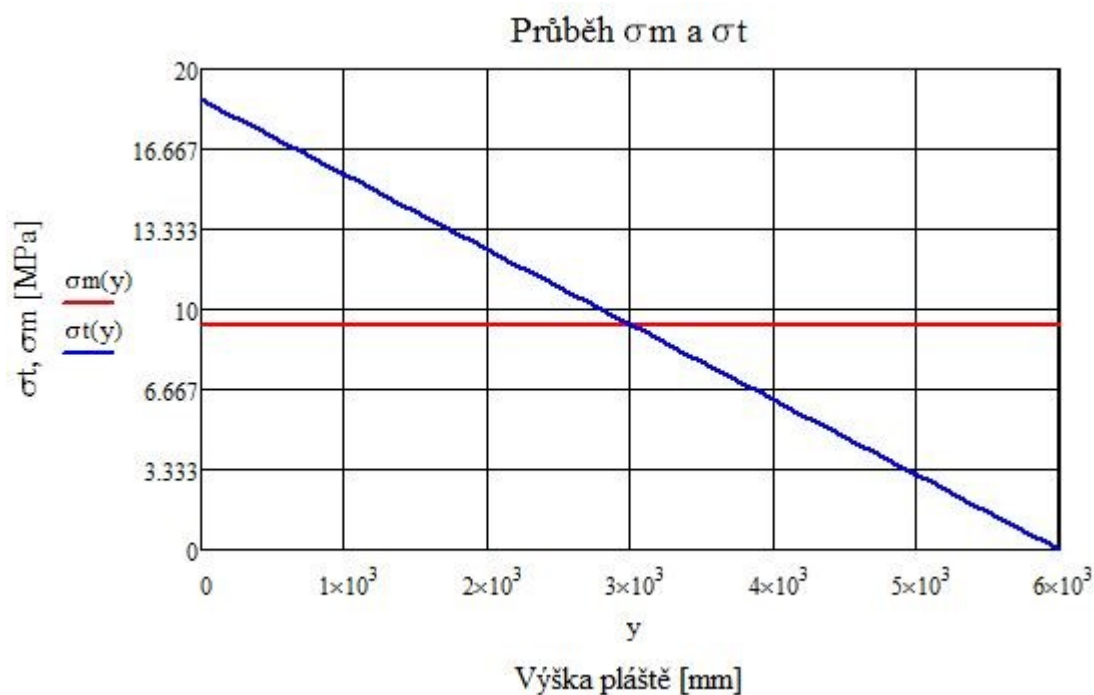
Tab. 6 Skutečné hodnoty napětí ve válcové části pláště pro první variantu uložení

Úsek pláště	Výška [mm]	σ_m [MPa]	σ_t [MPa]	σ_R^{HMH} [MPa]
1.	0	9,375	18,750	16,238
	500	9,375	17,188	14,905
	1000	9,375	15,625	13,622
	1500	9,375	14,063	12,402
2.	2000	9,375	12,500	11,267
	2500	9,375	10,938	10,246
	3000	9,375	9,375	9,375
3.	3500	9,375	7,813	8,700
	4000	9,375	6,250	8,268
	4500	9,375	4,688	8,119
4.	5000	9,375	3,125	8,268
	5500	9,375	1,563	8,700
	6000	9,375	0	9,375

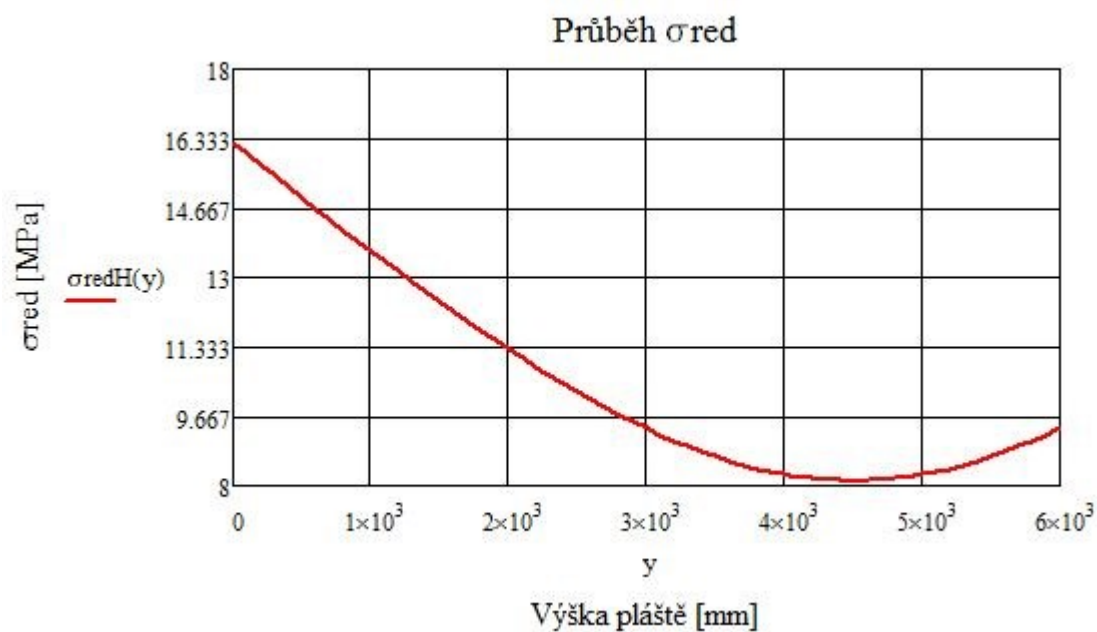
4.1.1. Grafy



Graf 1 Rozložení hydrostatického tlaku p ve válcové části pláště zásobníku



Graf 2 Průběh skutečného meridiánového napětí σ_m a obvodového napětí σ_t u první varianty uložení válcové části pláště zásobníku



Graf 3 Průběh redukovaného napětí σ_R^{HMH} podle hypotézy HMM u první varianty uložení válcové části pláště zásobníku

4.2. Druhá varianta uložení válcové části pláště zásobníku

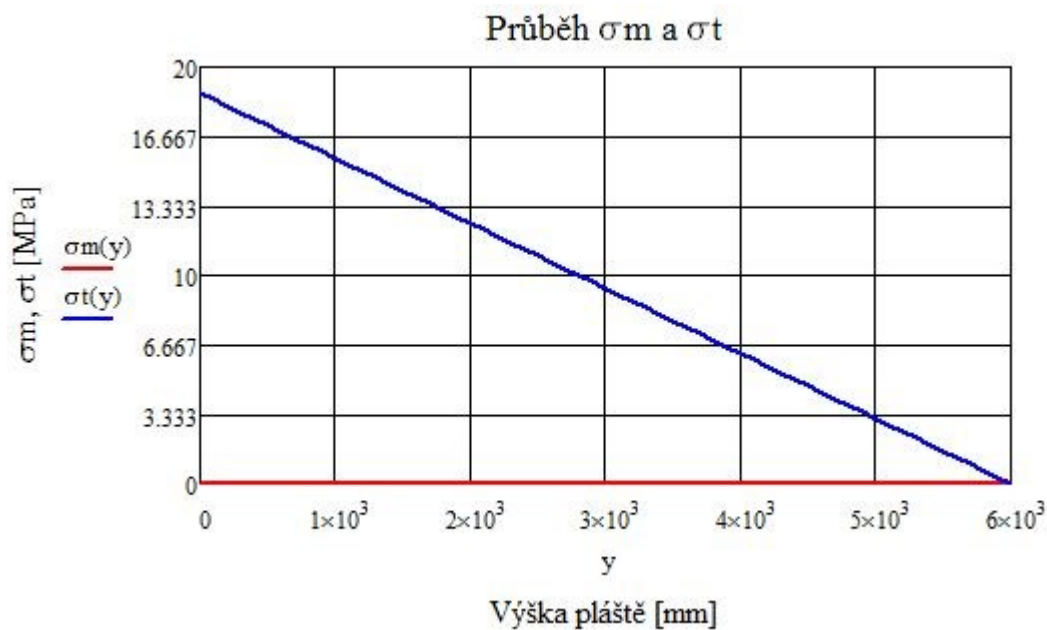
Stejně jako u první varianty uložení válcové části pláště zásobníku byla zvolena tloušťka 4 mm i pro druhou variantu uložení. Pro tento případ byly také vypočteny skutečné hodnoty meridiánového σ_m a obvodového σ_t napětí v následující tabulce z rovnic (3.18) a (3.19).

Tab. 7 Skutečné hodnoty napětí ve válcové části pláště pro druhou variantu uložení

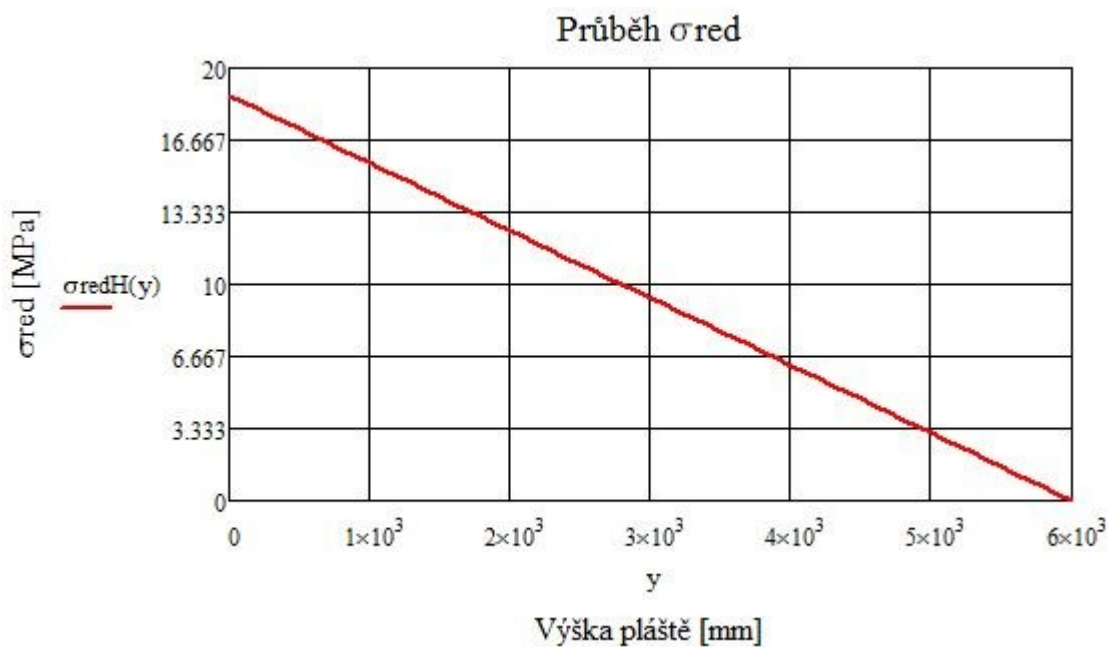
Úsek pláště	Výška [mm]	σ_m [MPa]	σ_t [MPa]	σ_R^{HMH} [MPa]
1.	0	0	18,750	18,750
	500	0	17,188	17,188
	1000	0	15,625	15,625
	1500	0	14,063	14,063
2.	2000	0	12,500	12,500
	2500	0	10,938	10,938
	3000	0	9,375	9,375
3.	3500	0	7,813	7,813
	4000	0	6,250	6,250
	4500	0	4,688	4,688
4.	5000	0	3,125	3,125
	5500	0	1,563	1,563
	6000	0	0	0

4.2.1. Grafy

Ze zjištěných skutečných napětí byly vykresleny grafy popisující zatížení válcové části pláště pro druhou variantu uložení.



Graf 4 Průběh skutečného meridiánového napětí σ_m a obvodového napětí σ_t u druhé varianty uložení válcové části pláště zásobníku



Graf 5 Průběh redukovaného napětí σ_R^{HMH} podle hypotézy HMH u druhé varianty uložení válcové části pláště zásobníku

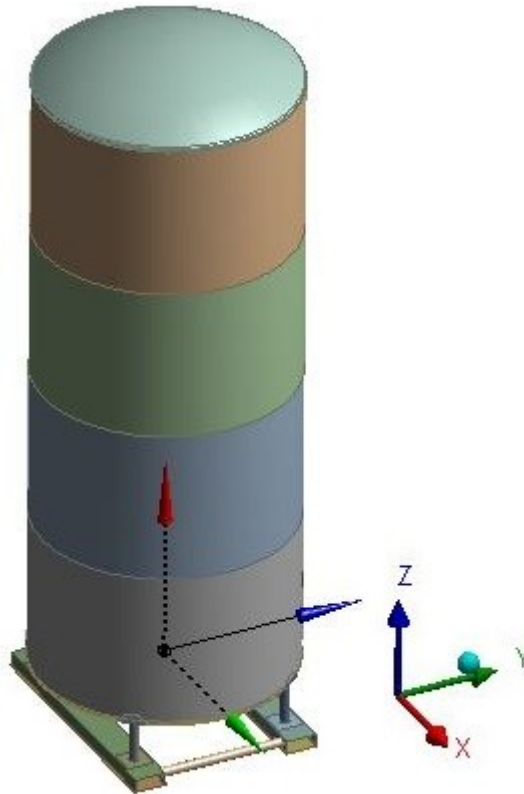
4.3. Skutečné uložení válcové části pláště zásobníku

Skutečné uložení bylo řešeno metodou MKP. Řešení touto metodou je přibližným numerickým řešením. Tímto postupem se hledané spojité funkce převádí na konečný počet neznámých parametrů. Díky těmto neznámým parametrům se aproximuje k hledaným spojitým funkcím. Tento krok se označuje jako diskretizace. Metodou MKP se daná geometrie součásti rozdělí na konečný počet elementů. Aplikují se okrajové podmínky a řešením soustavy rovnic popisující chování součásti se dojde k řešení (primární proměnné) [6].

Pro výpočet a porovnání s oběma variantami uložení byl zvolen zásobník navržený dle konstrukční varianty B, jehož podrobnější popis bude později uveden v kapitole 5.2.

4.3.1. Výpočtový model

Model byl vytvořen v plechovém 3D modeláři. Importovanému modelu byly v geometrickém modeláři výpočtového softwaru přiřazeny tloušťky jednotlivých částí zásobníku dle předchozího návrhu (viz. Obr. 10). Parametry materiálu zásobníku byly modelu přiřazeny z Tab. 1.

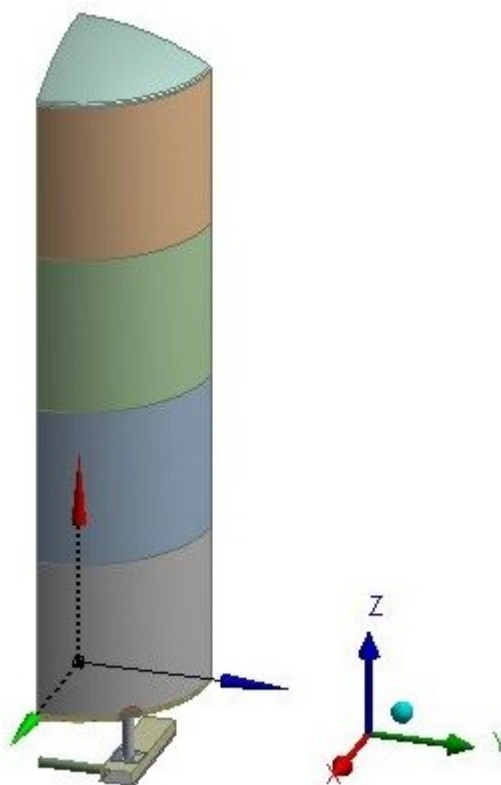


Obr. 11 Importovaná geometrie konstrukční varianty B do výpočtového softwaru

4.3.1.1. Symetrie

Některé typy úloh lze řešit pomocí symetrie. Proto, aby mohl být daný problém takto řešen, musí být symetrická geometrie, materiálové vlastnosti a zatížení. Výhodou symetrické úlohy je, že dojde k redukci celkového počtu elementů, podstatně se zkrátí doba řešení ve výpočtovém softwaru a zůstane zachována přesnost řešení. Mezi nejčastější typy symetrie patří rovinná, dále pak osová, rotační a periodická [6] [7] .

V případě zásobníku se jedná o rovinnou symetrii. Celý model je symetrický podle rovin XZ a YZ, což je patrné z Obr. 11. Díky této symetrii byla úloha dále řešena pouze se čtvrtinou geometrie z původní návrhové geometrie.



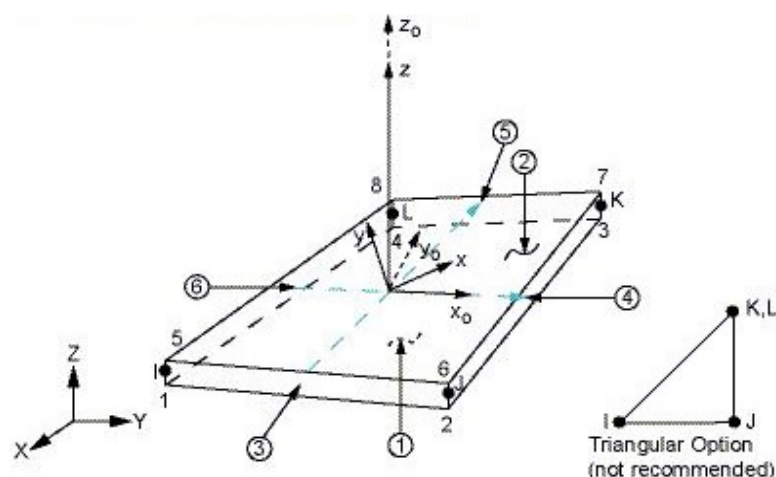
Obr. 12 Vzniklá geometrie po využití rovinné symetrie

4.3.2. Sít'

Proto, aby řešení bylo správné, je třeba, aby konečno-prvková síť pokryla co nejlépe model zásobníku. Hlavně v oblastech významných z hlediska návrhu nebo v místech, ve kterých se předpokládá výskyt zvýšeného namáhání. Nabízelo by se tedy pokrýt celý model co největším počtem elementů, avšak takovýto krok by mohl vést k neúměrně dlouhému času řešení celého problému. Vzhledem k tomu, že byly použity skořepinové prvky, zvolením velmi malých elementů by mohlo dojít ke vnesení velké numerické chyby do řešení.

Automaticky vygenerovaná síť nebyla přijatelná z hlediska velikosti elementů na válcové části pláště zásobníku. Původní elementy byly příliš velké. Proto byla síť na plášti zásobníku zhuštěna, vyjímaje sférické víko, to nebylo pro výpočet důležité. Velikost elementu na válcové části byla stanovena na hodnotu 48 mm. Další popis vytvoření sítě na ostatních částech zásobníku bude později uveden v kapitole 5.1.2.

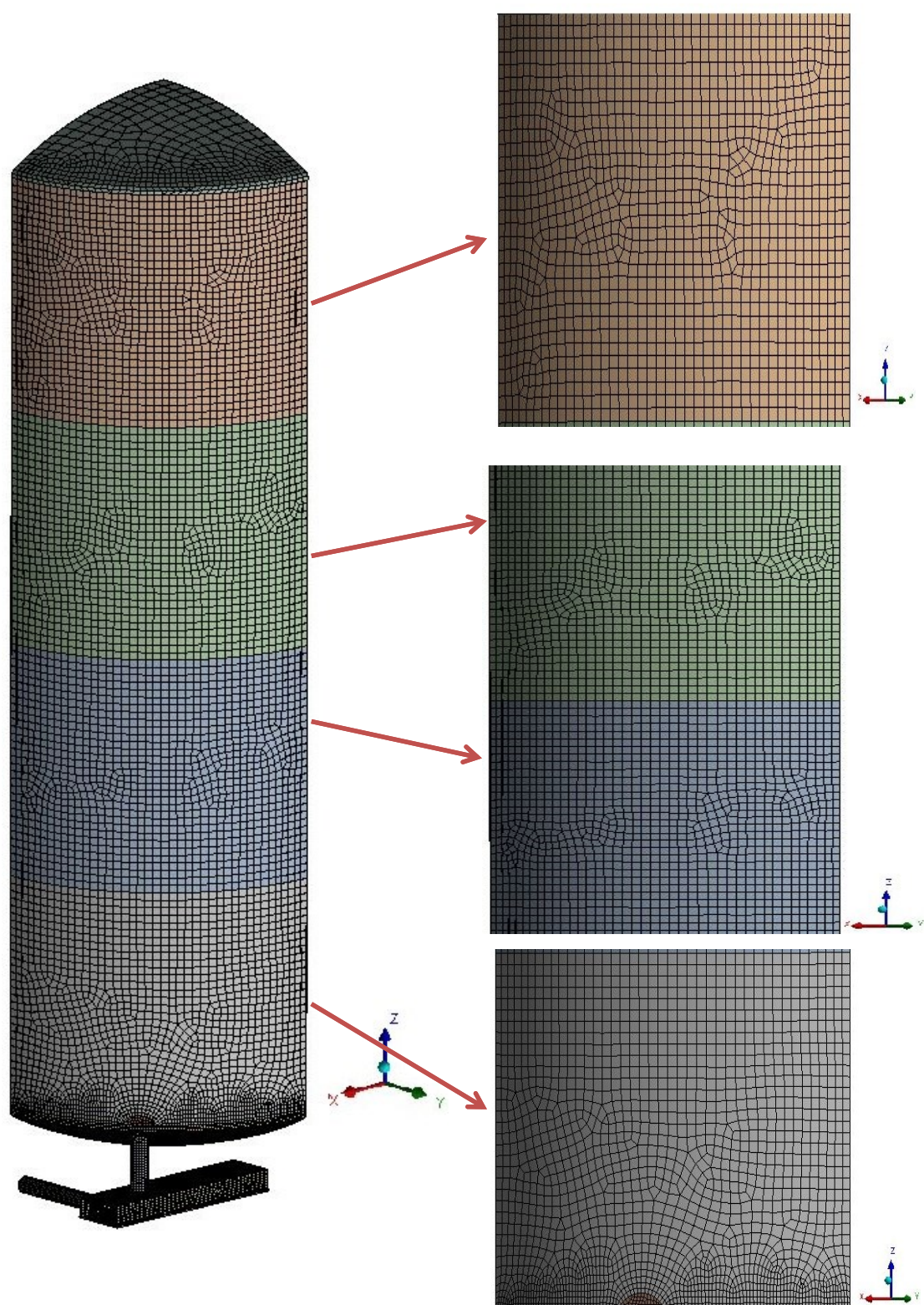
Jako typ prvku byl použit SHELL181, který je vhodný pro tenké až mírně tlusté skořepinové struktury. Tento typ prvku je čtyřuzlový a má šest stupňů volnosti (posuvy v osách X, Y, Z a natočení kolem os X, Y, Z). Nejlépe se hodí pro analýzu v lineární oblasti chování materiálu. SHELL181 může být využit při analýze vrstvených materiálů, jako jsou kompozity nebo sendvičové konstrukce. Tento prvek může mít i tvar trojúhelníku. Řešení s trojúhelníkovým tvarem prvku ale není doporučováno [8].



x_0 = Element x-axis if ESYS is not provided.

x = Element x-axis if ESYS is provided.

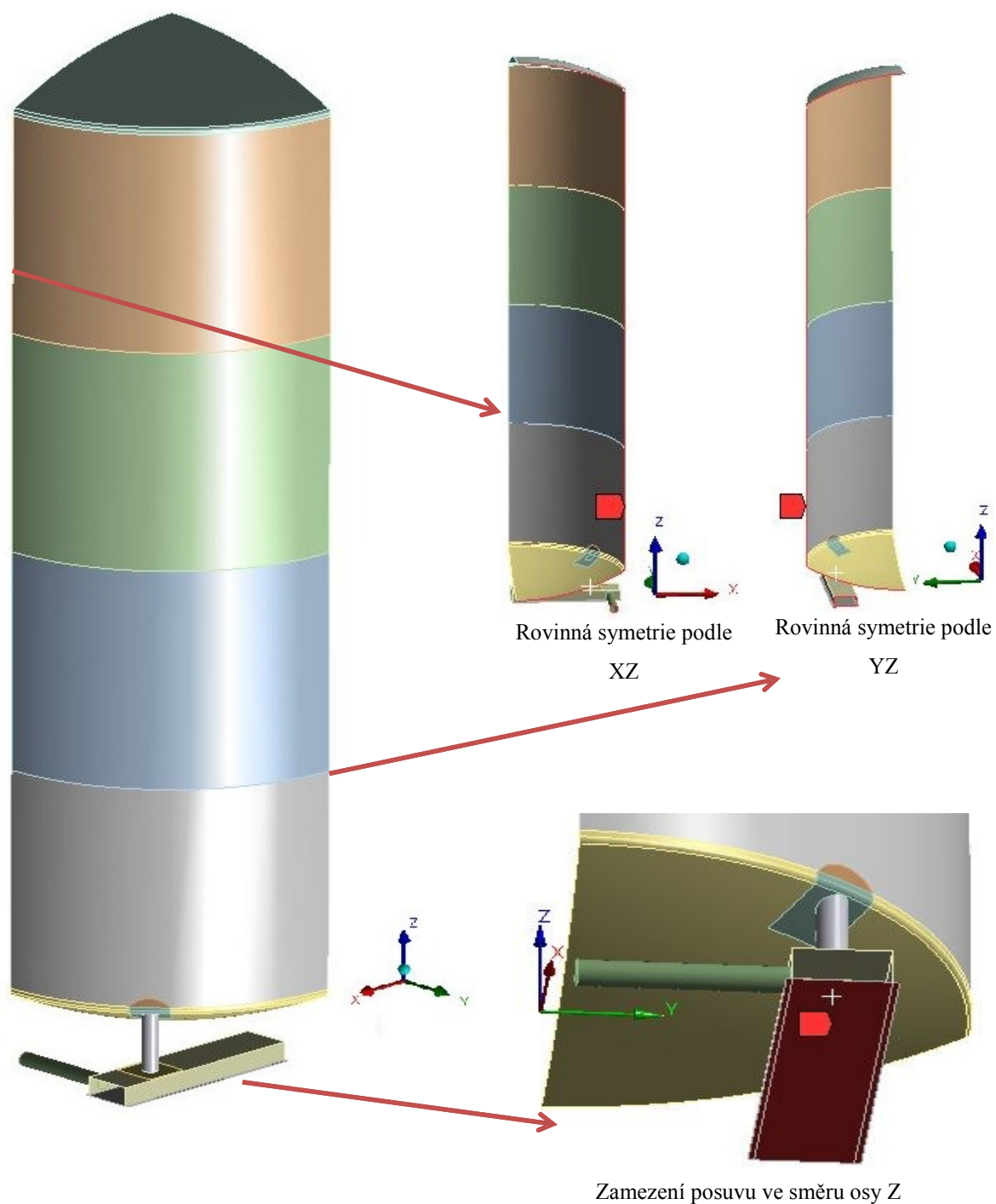
Obr. 13 Geometrie prvku SHELL181 [8]



Obr. 14 Síť vytvořená na válcové části pláště zásobníku

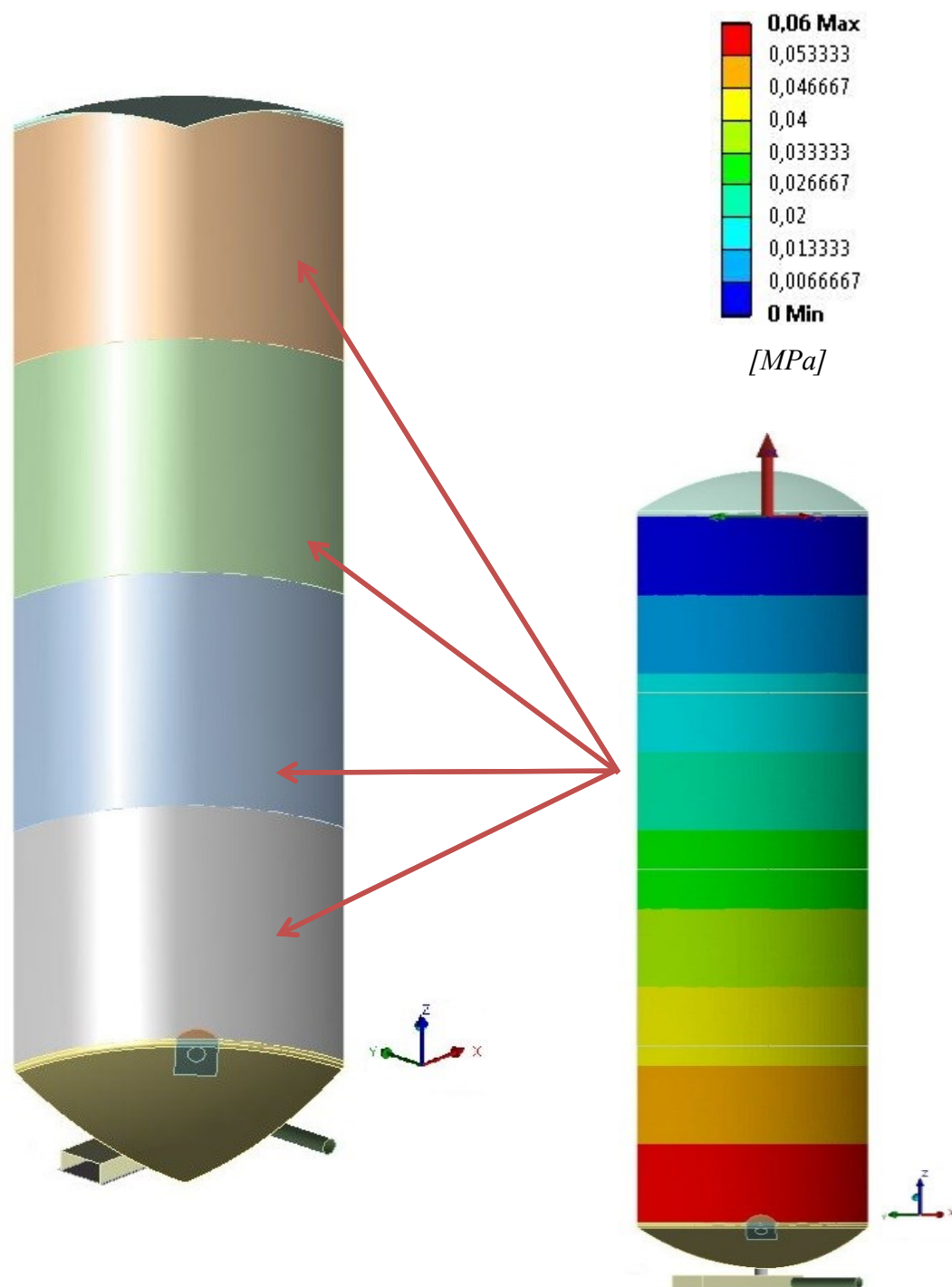
4.3.3. Okrajové podmínky

První geometrickou okrajovou podmínkou byla rovinná symetrie podle rovin XZ a YZ . Druhou geometrickou okrajovou podmínkou bylo zamezení posuvu v ose Z , ta byla zadána na spodní plochu podstavy.



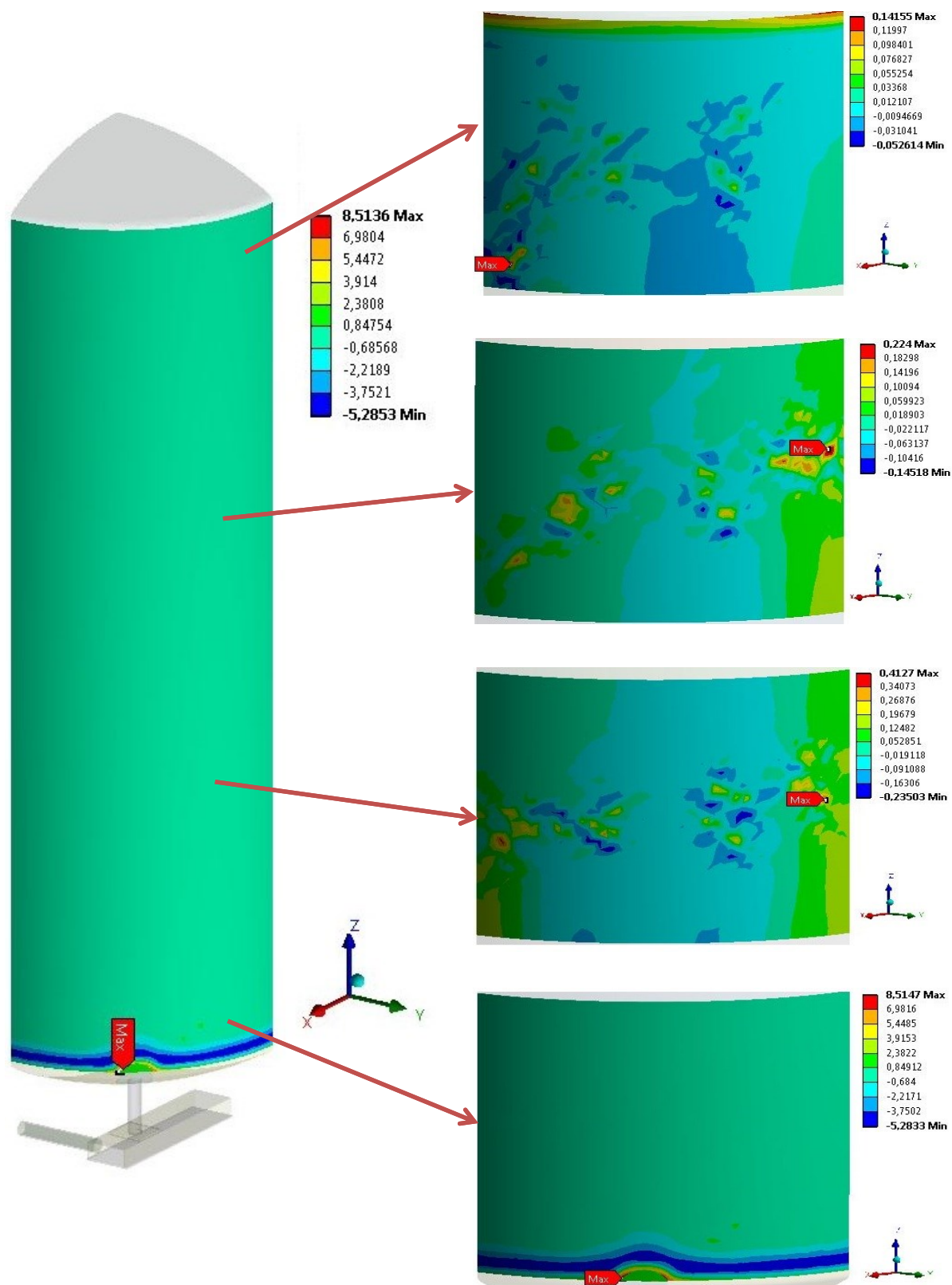
Obr. 15 Geometrické okrajové podmínky

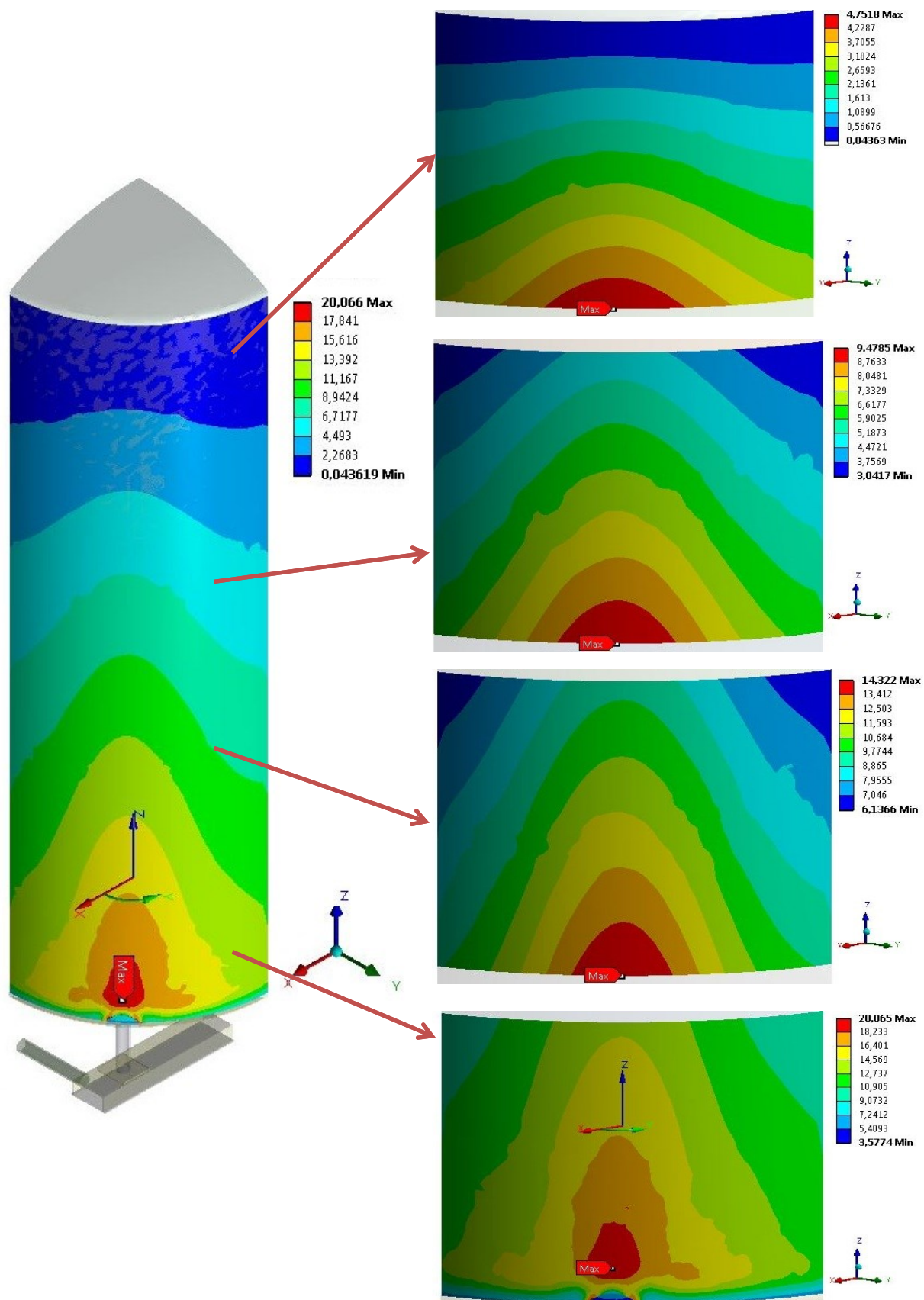
Jako strukturální okrajová podmínka byl zadán hydrostatický tlak. Bylo potřeba vytvořit nový souřadný systém, aby hydrostatický tlak pracoval správně. Hydrostatický tlak byl zadán na celou válcovou část pláště na vnitřní plochy. Jeho hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.



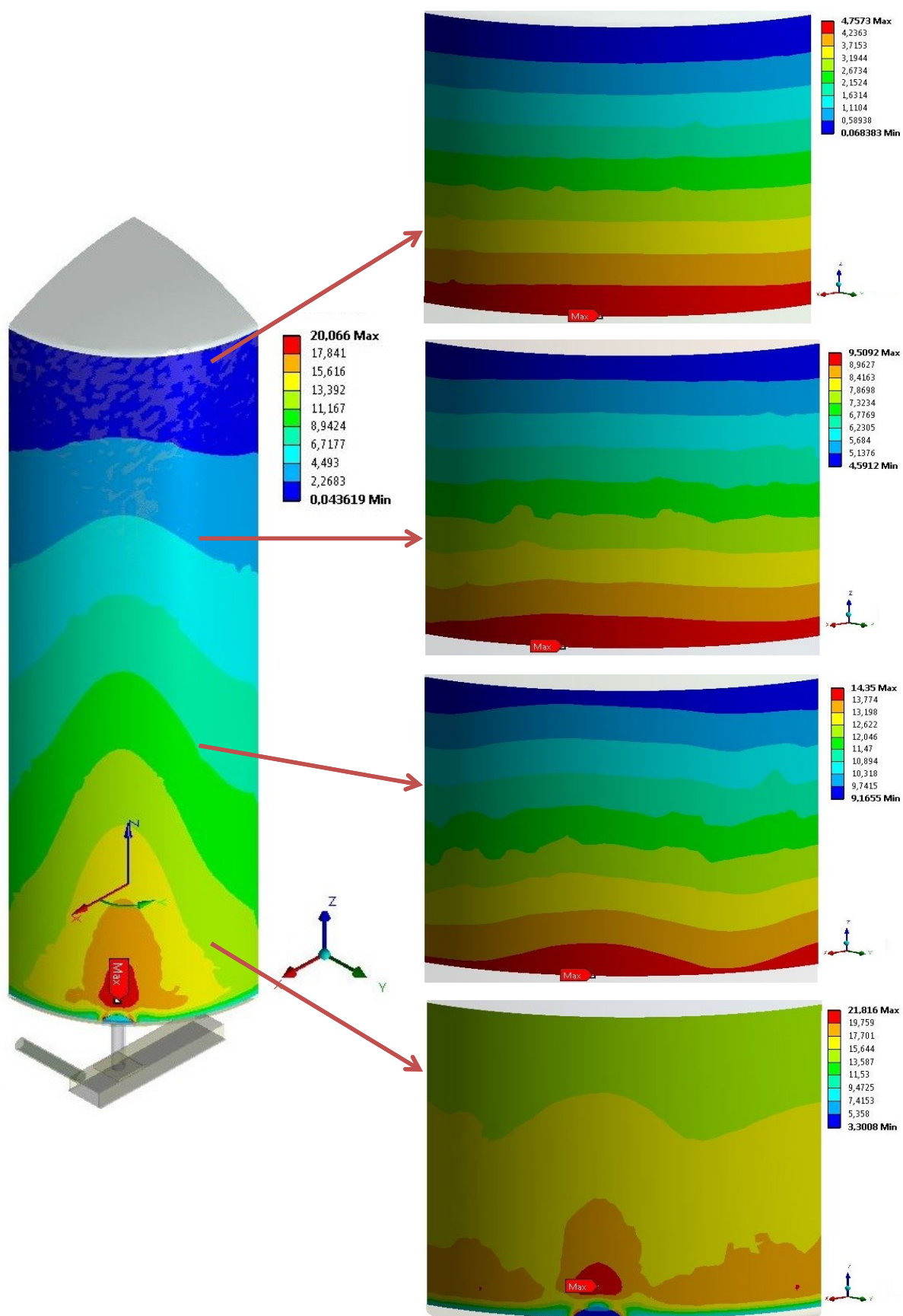
Obr. 16 Strukturální okrajová podmínka – hydrostatický tlak p [MPa]

4.3.4. Získané výsledky

Obr. 17 Meridiánové napětí σ_m [MPa] ve válcové části pláště zásobníku



Obr. 18 Obvodové napětí σ_t [MPa] ve válcové části pláště zásobníku



Obr. 19 Redukované napětí σ_R^{MH} [MPa] ve válcové části pláště zásobníku

4.4. Dílčí závěr a zhodnocení

Zjištěná napětí ze všech tří variant uložení válcové části pláště zásobníku byla porovnána v bodech dle Obr. 5. Dále byly porovnány skutečné bezpečnosti válcové části pláště zásobníku z rovnice (4.1).

$$k_{skut}^{HMH} = \frac{\sigma_{DOV}}{\sigma_R^{HMH}} \quad (4.1)$$

Tab. 8 Porovnání meridiánového napětí σ_m [MPa]

Výška [mm]	σ_m [MPa]	První varianta uložení	Druhá varianta uložení	Skutečné uložení
0	1. bod	9,375	0	8,515
1500	2. bod	9,375	0	0,413
3000	3. bod	9,375	0	0,224
4500	4. bod	9,375	0	0,142

Tab. 9 Porovnání obvodového napětí σ_t [MPa]

Výška [mm]	σ_t [MPa]	První varianta uložení	Druhá varianta uložení	Skutečné uložení
0	1. bod	18,750	18,750	20,065
1500	2. bod	14,063	14,063	14,322
3000	3. bod	9,375	9,375	9,479
4500	4. bod	4,688	4,688	4,752

Tab. 10 Porovnání redukovaného napětí σ_R^{HMH} [MPa]

Výška [mm]	σ_R^{HMH} [MPa]	První varianta uložení	Druhá varianta uložení	Skutečné uložení
0	1. bod	16,238	18,750	21,816
1500	2. bod	12,402	14,063	14,350
3000	3. bod	9,375	9,375	9,509
4500	4. bod	8,119	4,688	4,758

Tab. 11 Porovnání skutečných bezpečností k_{skut}^{HMH} [-]

	První varianta uložení	Druhá varianta uložení	Skutečné uložení
k_{skut}^{HMH} [-]	9,65	8,36	7,18

Z výsledků vyplynulo, že ani jedna varianta uložení řešená analyticky neodpovídá přesně skutečnému uložení pláště nádoby. Více se však skutečnému uložení přibližuje varianta druhá. Nejlepší výsledek by však zaručila teorie tenkostěnných nádob zahrnující momentovou teorii. Tato teorie je ale nad rámec bakalářského studia a je velmi složitá.

Cílem porovnání jednotlivých variant uložení pláště nádoby bylo zjistit, zda byla tloušťka pláště navrhnutá správně. Pokud by se bezpečnosti vypočítané analytickým řešením příliš lišily od bezpečnosti zjištěné MKP řešením, nebyla by zajištěna provozuschopnost součásti a mohlo by dojít k havárii a dalším problémům. I přesto, že nebyla použita teorie tenkostěnných nádob zahrnující momentové namáhání, navrhnutá tloušťka válcové části pláště zásobníku byla dostačující.

Pokud by investor vyžadoval velkou úsporu materiálu při výrobě pláště zásobníku, bylo by možno navrhnout plášť se skokovou změnou tloušťek v jednotlivých částech. Otázkou by však bylo, zda by to umožnila technologie výroby a jestli by nakonec výroba nebyla nákladnější. Z vypočítané bezpečnosti lze usuzovat, že je až příliš vysoká. Je ale třeba si uvědomit, že do výpočtu nebyly zahrnuty povětrnostní vlivy a extrémní pracovní podmínky. Tyto vlivy by bezpečnost jistě snížily.

5. Řešení technického problému – návrh stojných nohou

Stojné nohy jsou z hlediska provozuschopnosti zásobníku velmi důležité. Stojné nohy nesmí být příliš náročné na výrobu a montáž. Prioritou však je, aby byly schopny přenést dané zatížení.

Existuje několik typů konstrukcí stojných nohou u zásobníků. Záleží na tom, jaké zatížení stojné nohy přenášejí. Většinou jsou stojné nohy zkonstruovány tak, že jejich osa rotace směřuje do těžiště pláště zásobníku pod mírným úhlem, jsou tedy šikmé. Používají se však i stojné nohy, kde je jejich osa rotace rovnoběžná s pláštěm zásobníku, tedy jsou rovné.

Stojné nohy mohou být přivařeny přímo na dno pláště zásobníku. Takové stojné nohy jsou využívány, pokud je v zásobníku uchováván materiál s malou hustotou (např. voda).

Dále jsou zásobníky, jejichž stojné nohy nejsou přivařeny přímo na dno pláště zásobníku. V místě styku stojných nohou se dnem pláště jsou umístěny krycí plechy. Tyto krycí plechy slouží jako výztuha, protože v takovém místě často dochází k nadměrné deformaci a vzniku velkých napětí. Konstrukce těchto stojných nohou mají daleko větší únosnost a jsou schopny přenést zatížení např. od sypkých materiálů.

Lze spatřit i zásobníky, které mají namísto krycích plechů věnec kolem celého dna. Věnec plní podobnou funkci jako krycí plechy. Ale protože je navařen po celém obvodu dna, má daleko větší vyztužující účinek.

Samozřejmě typy konstrukcí stojných nohou uvedené v předchozích odstavcích jsou pouze základní, existuje mnoho variant a kombinací, např. rovné s věncem, šikmé s krycími plechy apod.

Konstrukční návrh stojných nohou byl řešen metodou MKP.



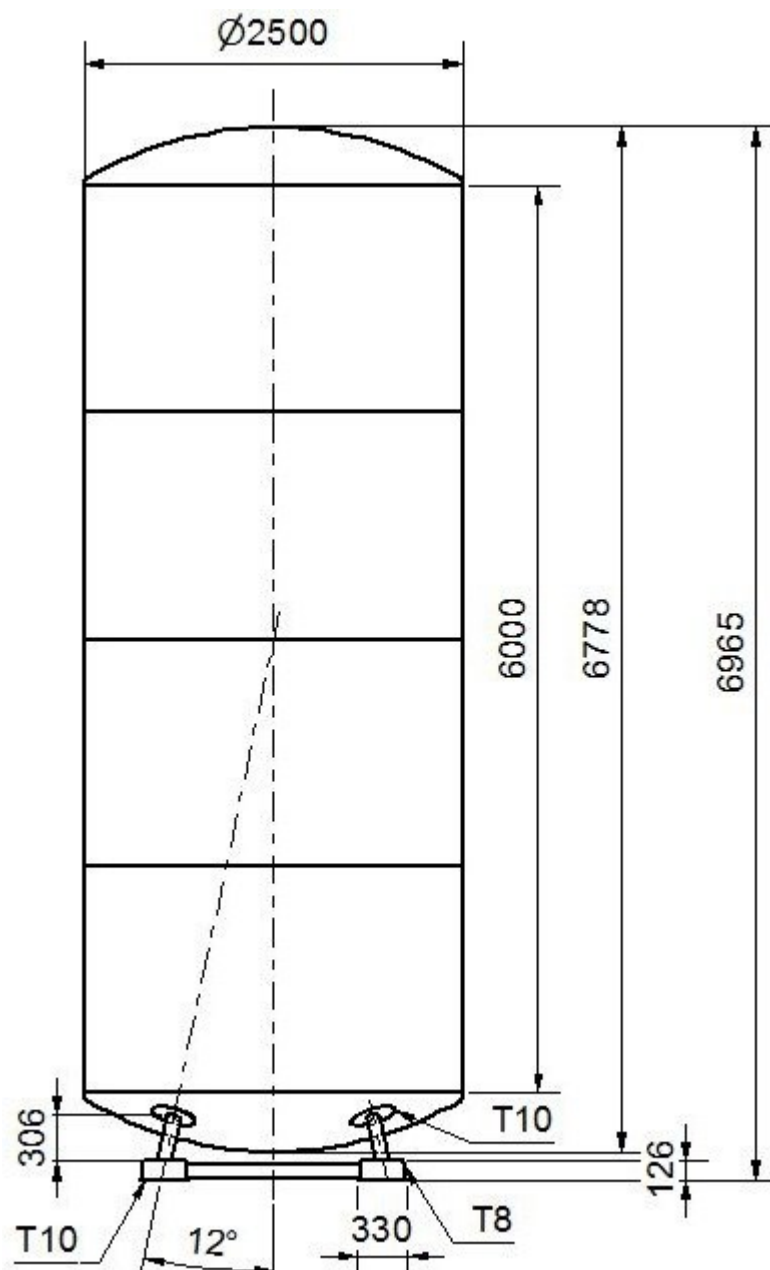
Obr. 20 Zásobník se šikmými stojnými nohami [9]



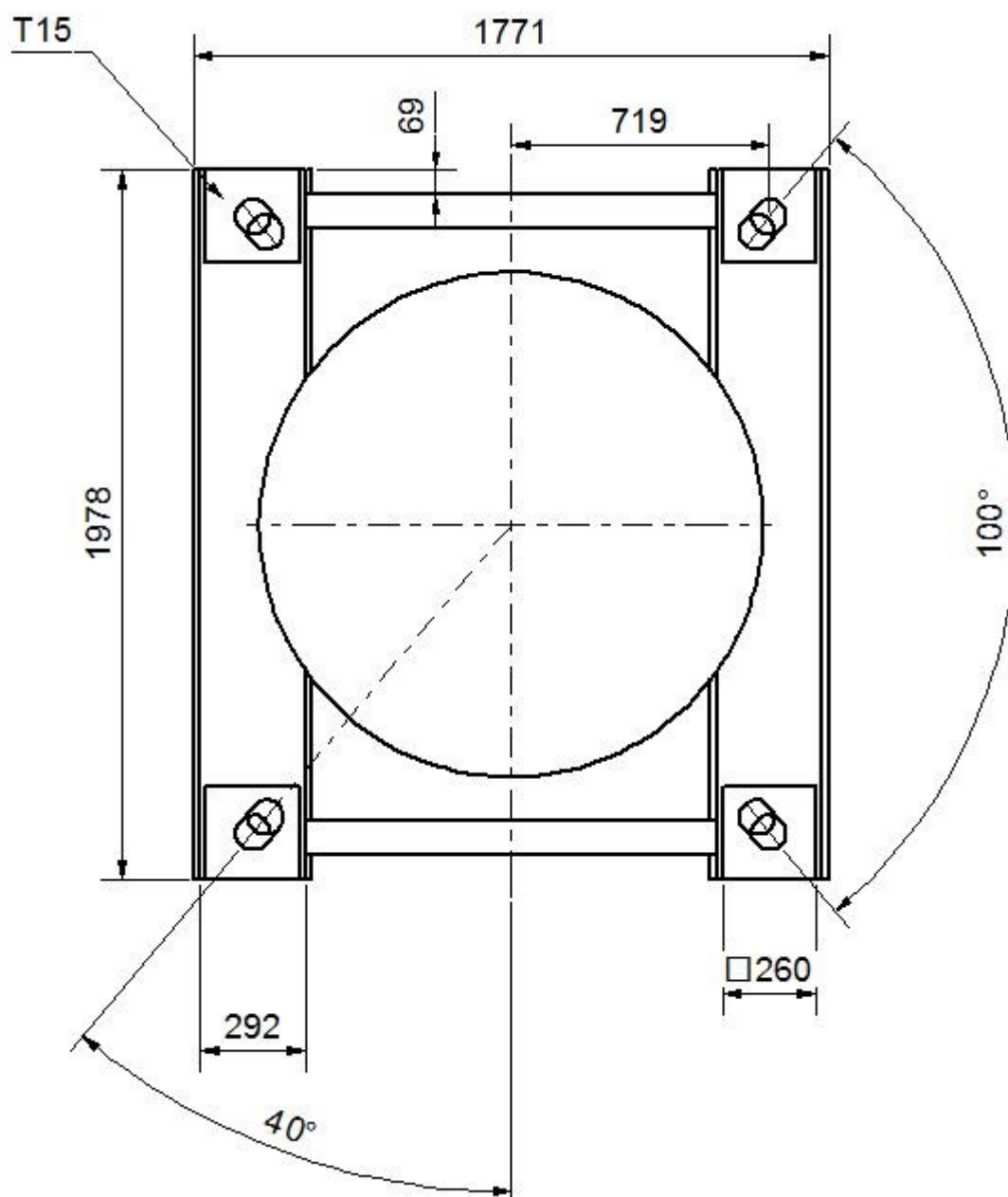
Obr. 21 Zásobník s rovnými stojnými nohami [10]

5.1. Konstrukční varianta A

Konstrukční varianta A vycházela a nejvíce se podobala původnímu návrhu stojných nohou, který byl poskytnut od výrobce na výkresech a v 3D modelu. Stojné nohy byly navrženy tak, že jejich osa rotace směřovala do těžiště pláště zásobníku pod mírným úhlem (více viz. Obr. 22 a Obr. 23).



Obr. 22 Schéma s kótami konstrukční varianty A (pohled zepředu)

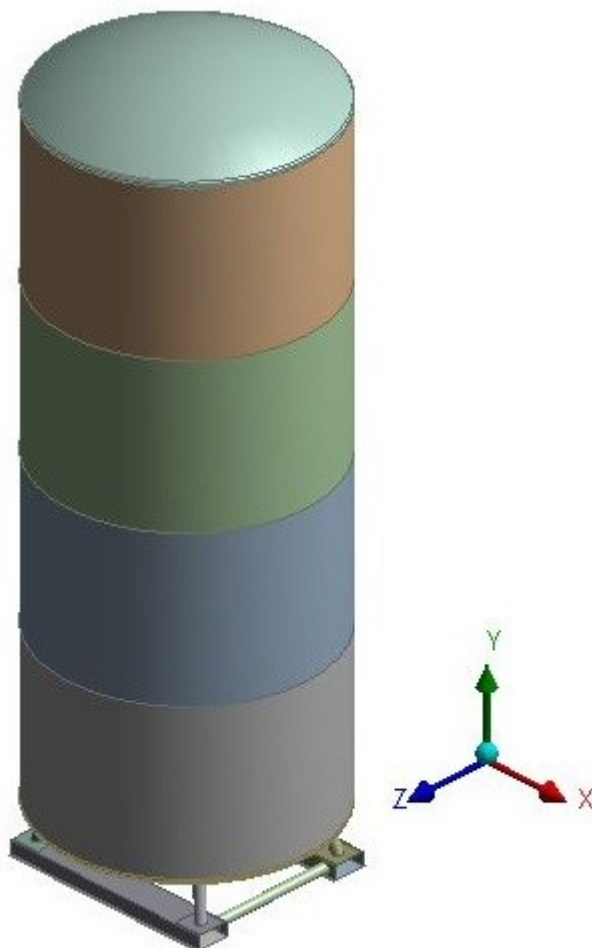


Obr. 23 Schéma podstavy s kótami konstrukční varianty A (pohled shora z částečného řezu)

Rozměry sférického dna a víka viz. Obr. 4.

5.1.1. Výpočtový model

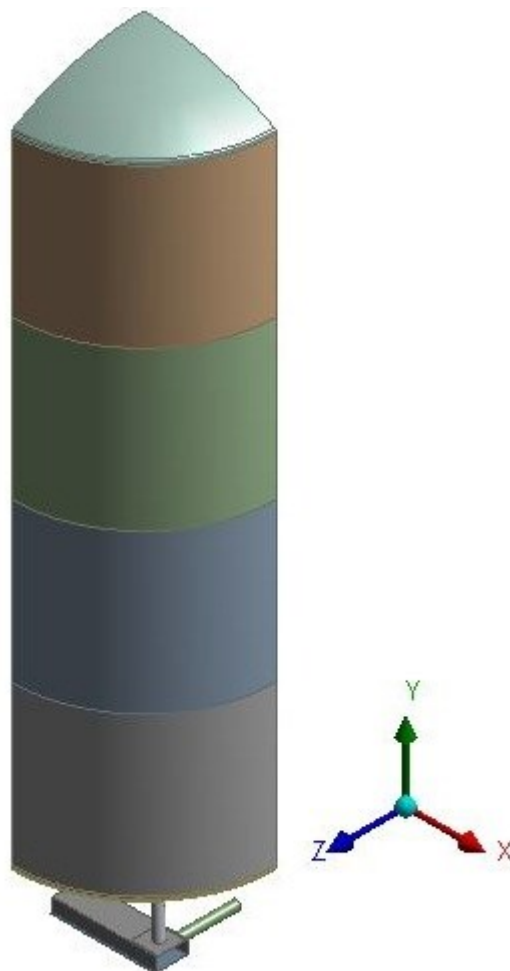
Model, který byl vytvořen na základě schémat (Obr. 22 a Obr. 23) v plechovém 3D modeláři, byl importován do výpočtového softwaru a byly mu přiřazeny tloušťky dle Obr. 10, Obr. 22 a Obr. 23. Parametry materiálu zásobníku byly přiděleny z Tab. 1.



Obr. 24 Importovaná geometrie do výpočtového softwaru (konstrukční varianta A)

5.1.1.1. Symetrie

Stejně jako v kapitole 4.3. byl i zde celý zásobník řešen pomocí rovinné symetrie. Roviny symetrie byly XY a YZ, což je zřejmé z Obr. 24.

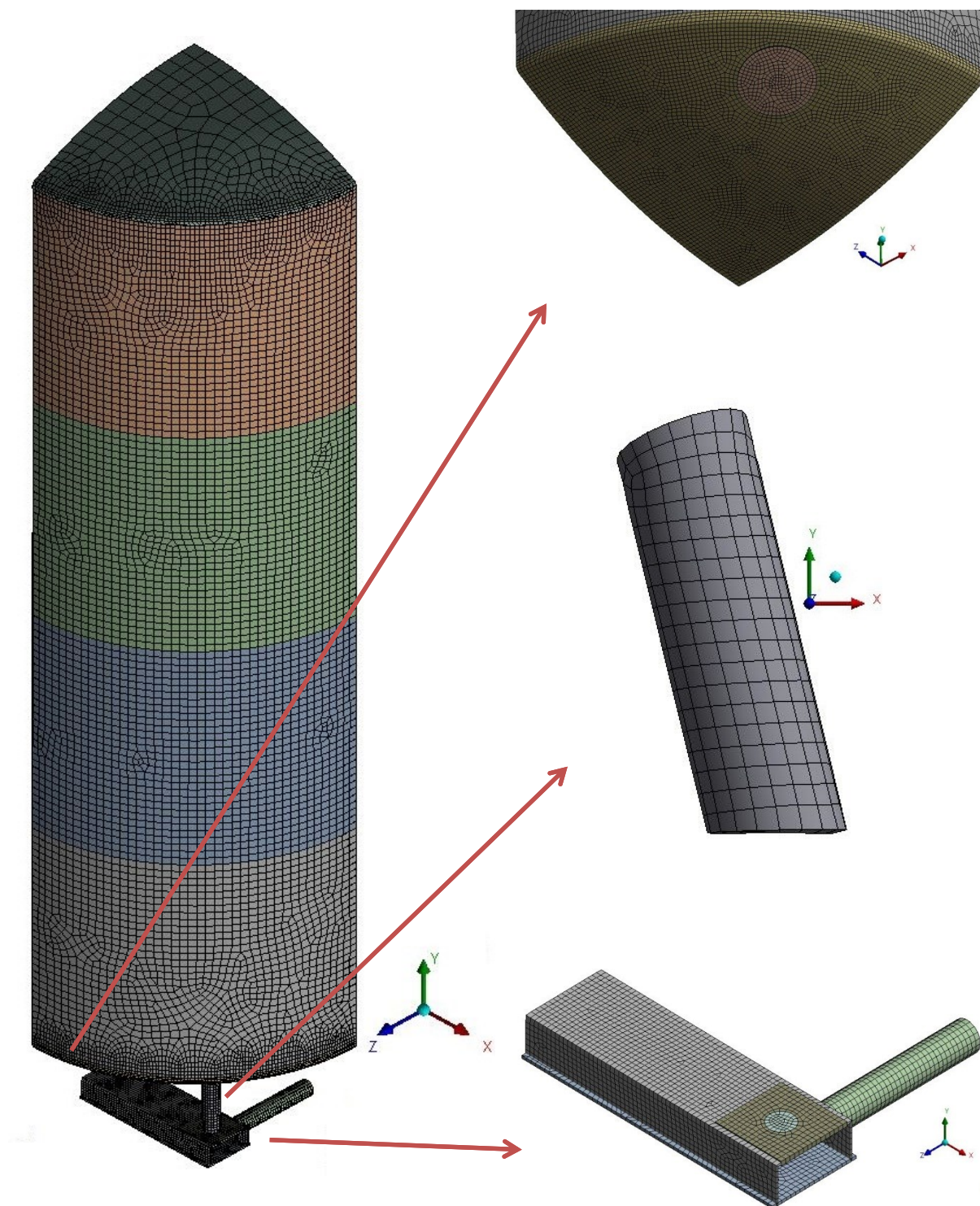


Obr. 25 Vzniklá geometrie při využití rovinné symetrie (konstrukční varianta A)

5.1.2. Sít'

Základní síť dostatečně neobsáhla geometrii zásobníku. Obsahovala příliš velké elementy na plášti zásobníku a na podstavě. Dále byla síť velmi nepravidelná na sférickém dně, stojinách a podstavě. Proto byla zvolena na válcové části pláště zásobníku velikost elementu 48 mm. Na sférickém dně, stojinách a celé podstavě byla zvolena velikost elementu 16 mm. Sférické víko nebylo z hlediska výpočtu příliš podstatné, zde byla ponechána základní síť.

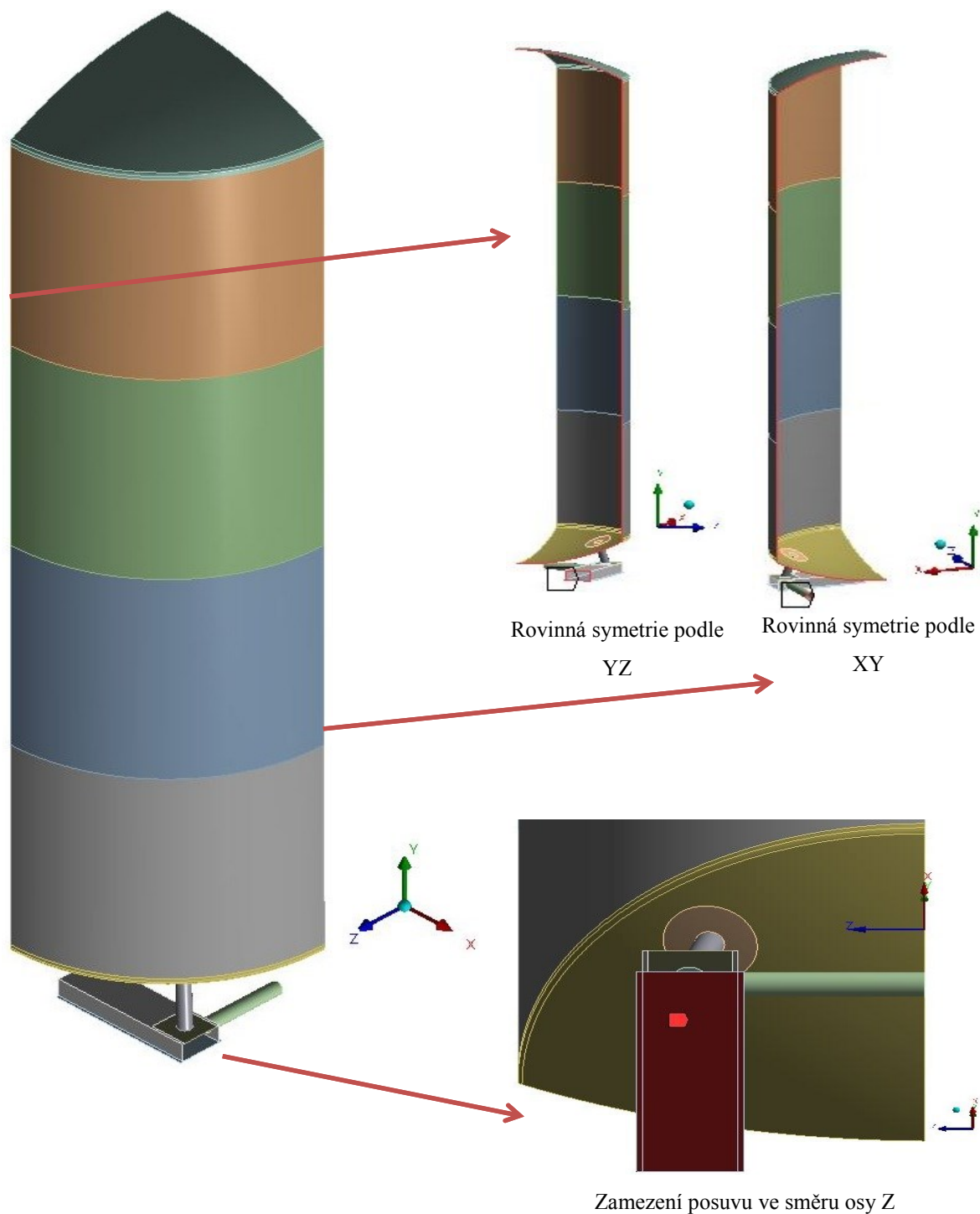
Prvek použitý pro analýzu byl SHELL181 (více viz. kapitola 4.3.2.).



Obr. 26 Sít' vytvořená na sférickém dně, stojině a podstavě (konstrukční varianta A)

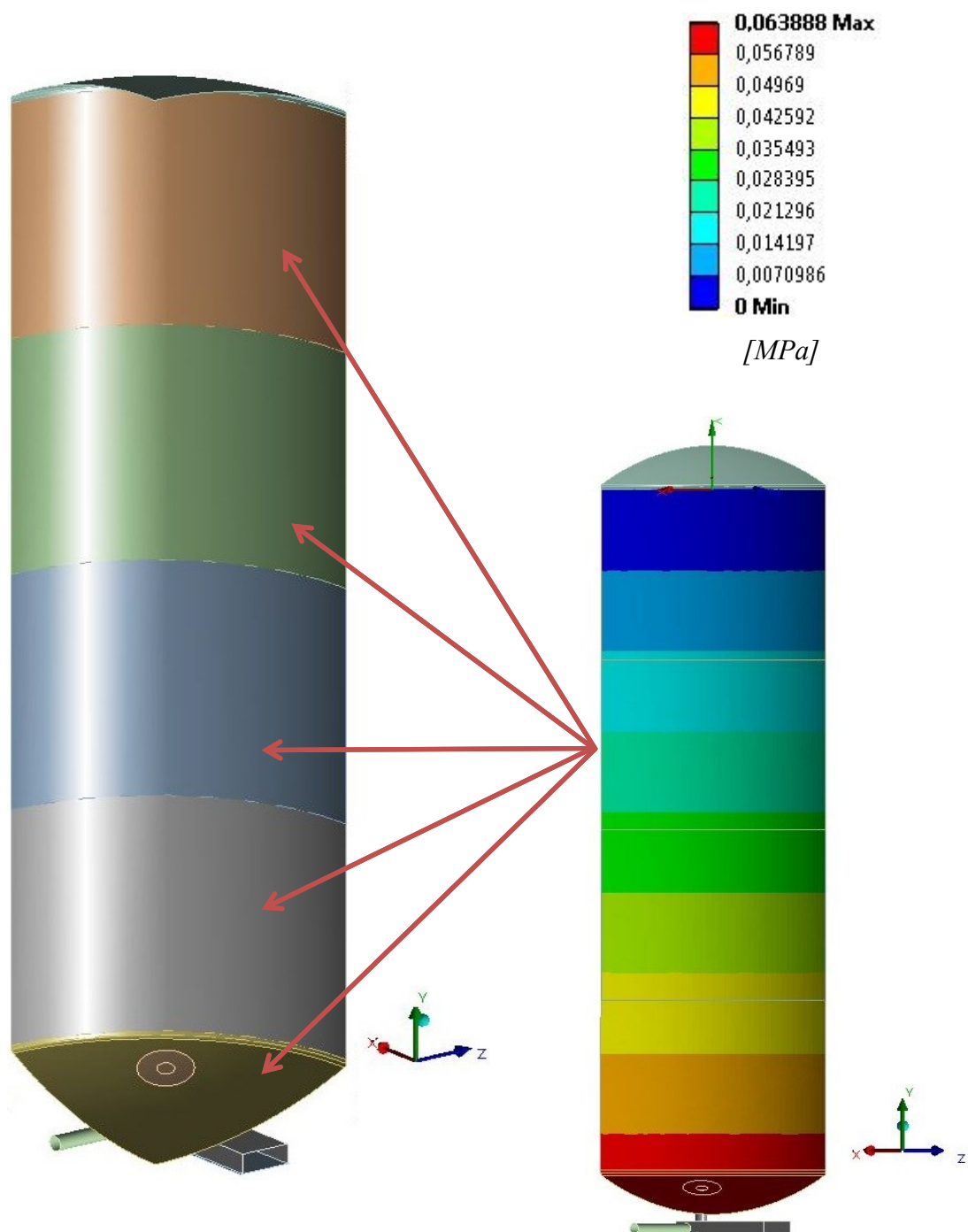
5.1.3. Okrajové podmínky

Geometrické okrajové podmínky byly dvě. První byla rovinná symetrie XY a YZ. Tou druhou bylo zamezení posuvu ve směru osy Z na spodní ploše podstavy.



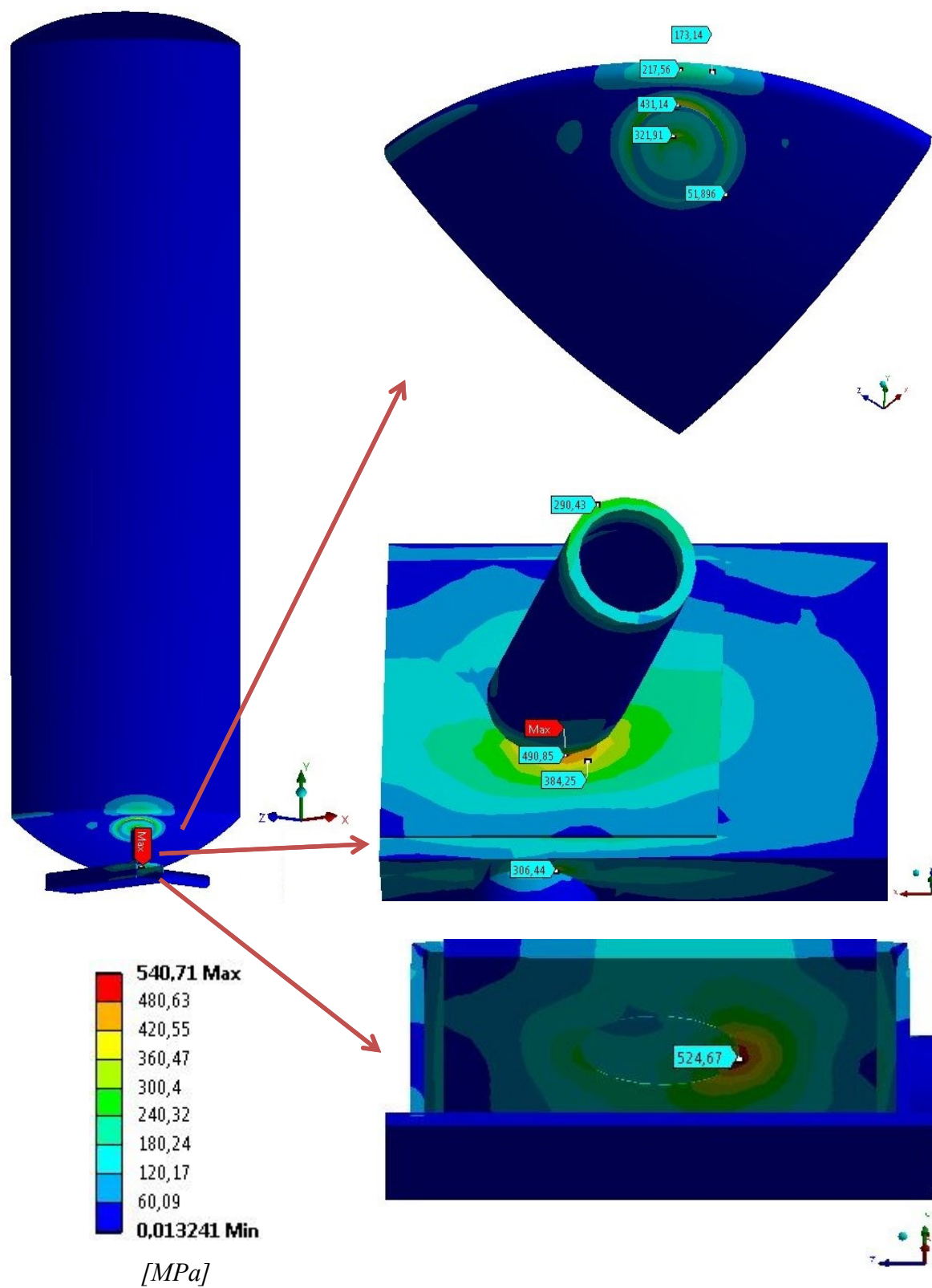
Obr. 27 Geometrické okrajové podmínky (konstrukční varianta A)

Strukturální okrajovou podmínkou byl hydrostatický tlak. Jeho parametry byly dříve uvedeny v Tab. 2. Po vytvoření nového souřadného systému byl zadán na vnitřní plochy válcové části pláště zásobníku a sférické dno.

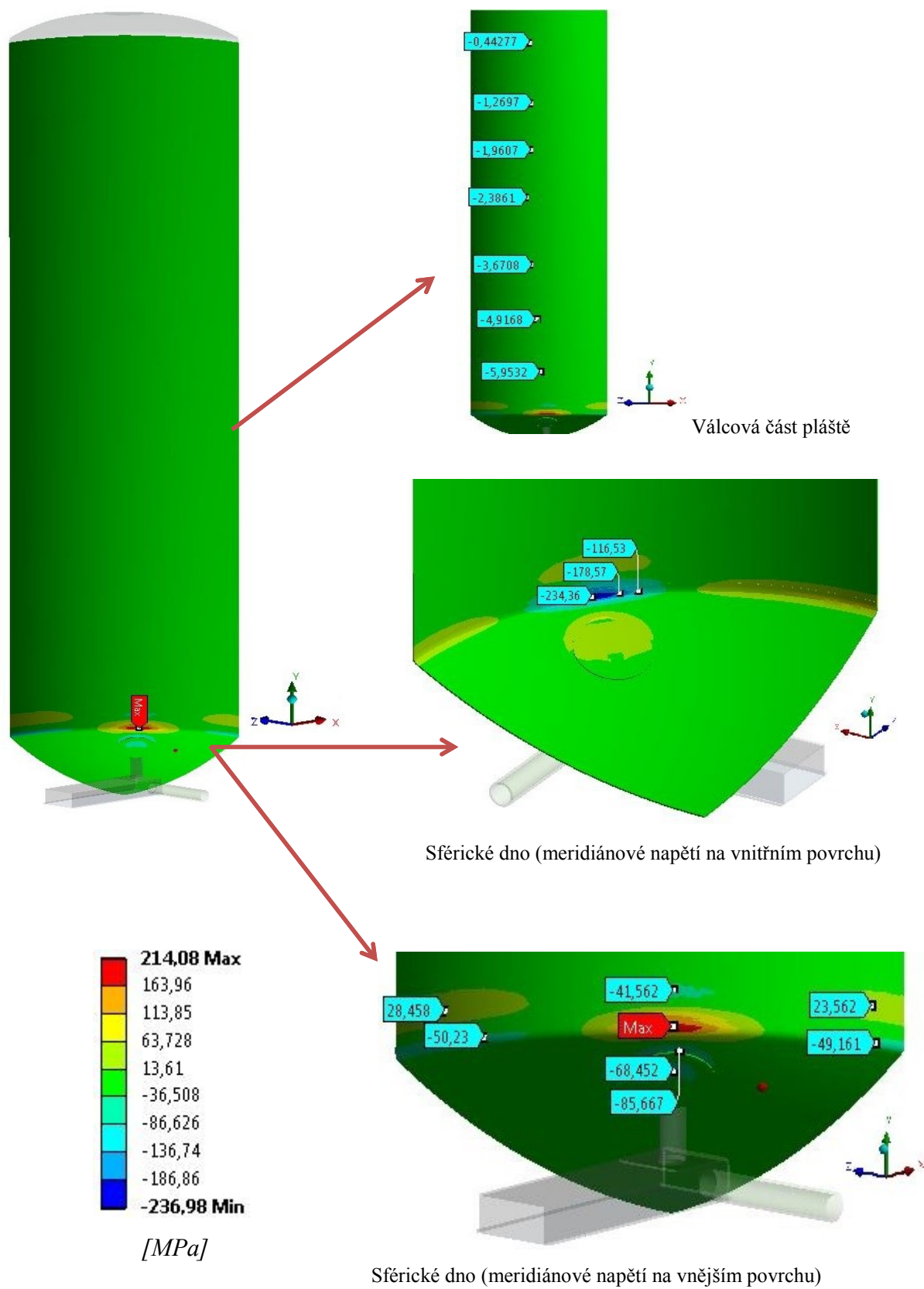


Obr. 28 Strukturální okrajová podmínka – hydrostatický tlak p [MPa] (konstrukční varianta A)

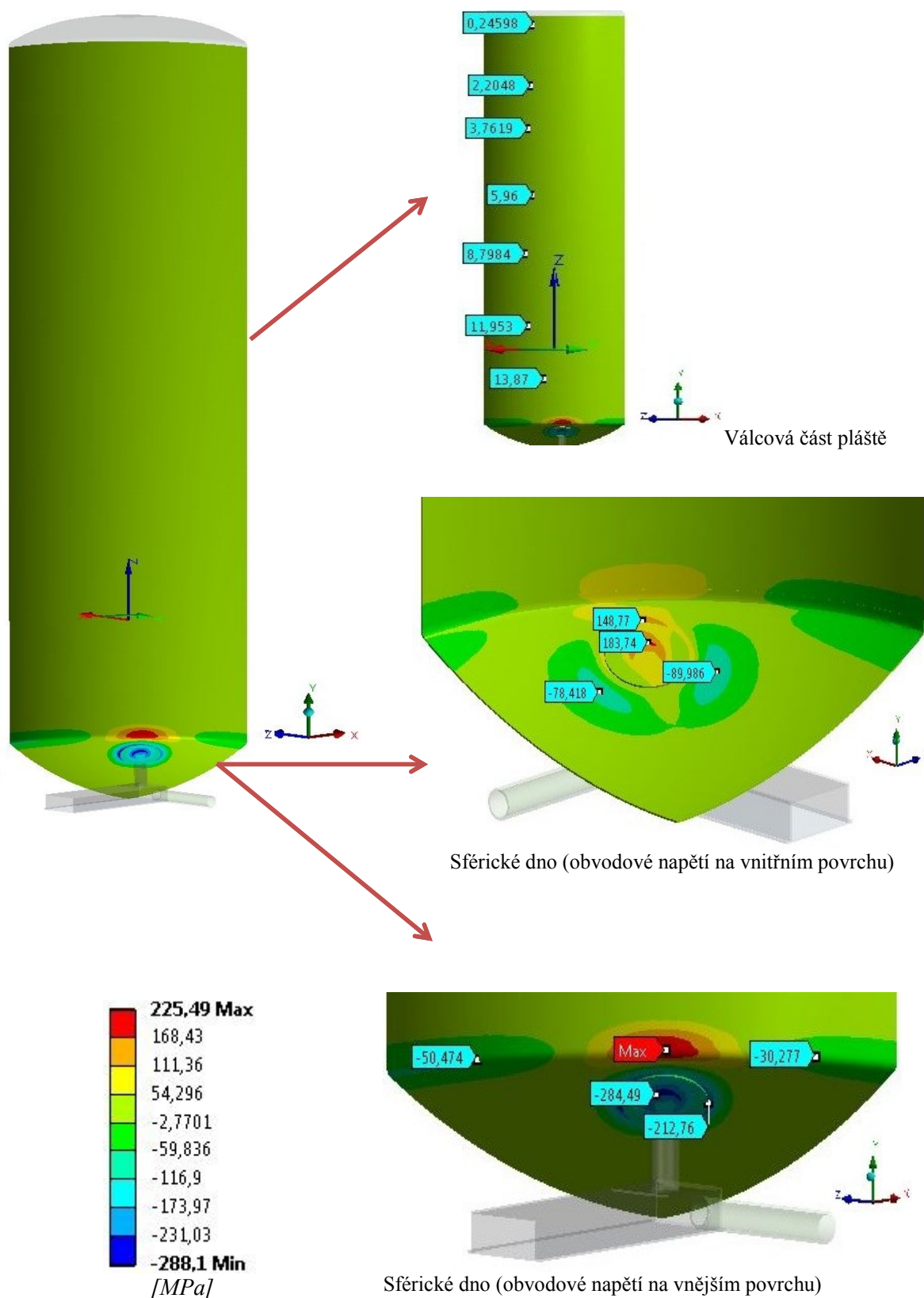
5.1.4. Získané výsledky



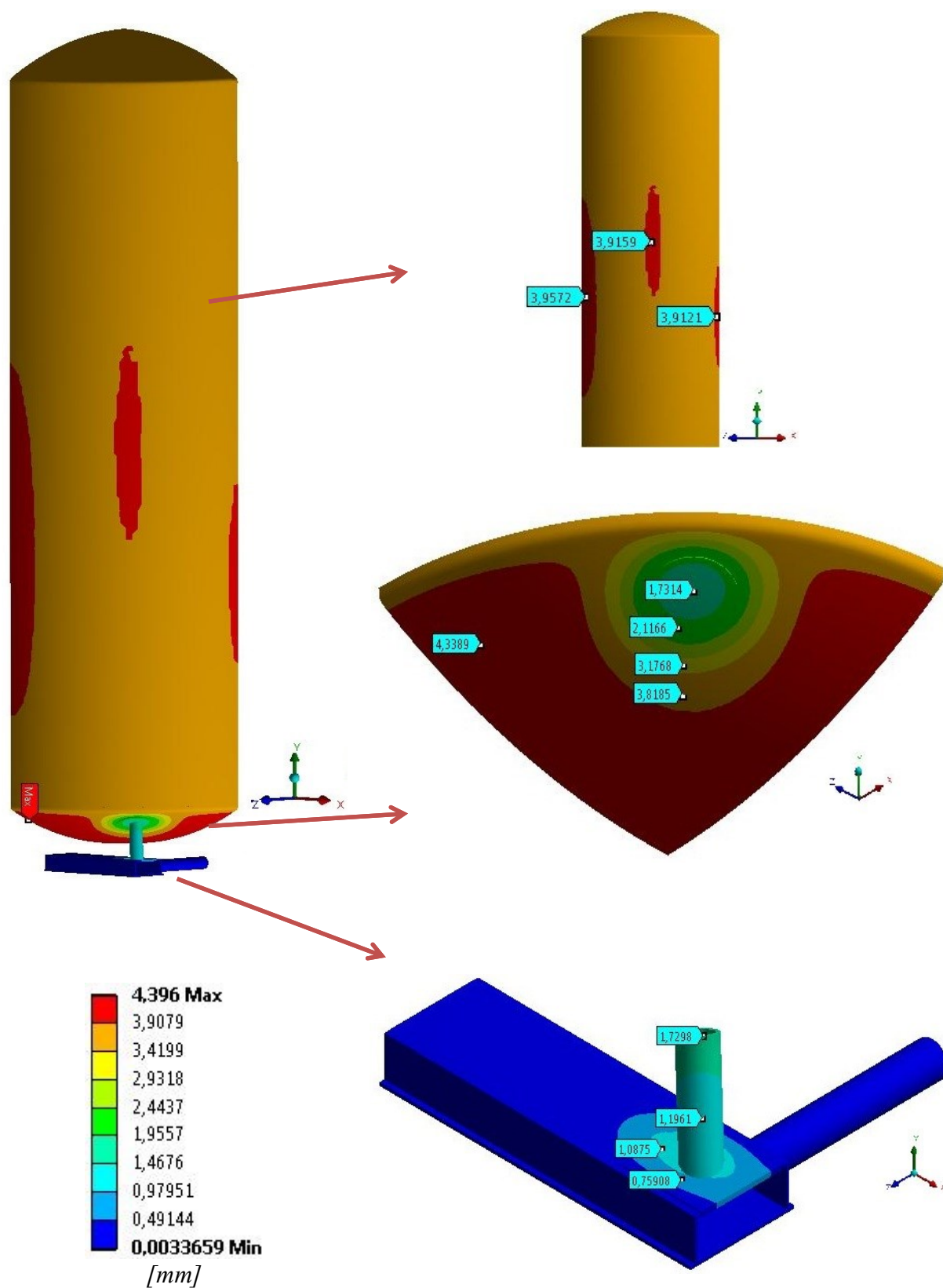
Obr. 29 Redukované napětí σ_R^{MH} [MPa] v místě sférického dna, stojiny a podstavy (konstrukční varianta A)



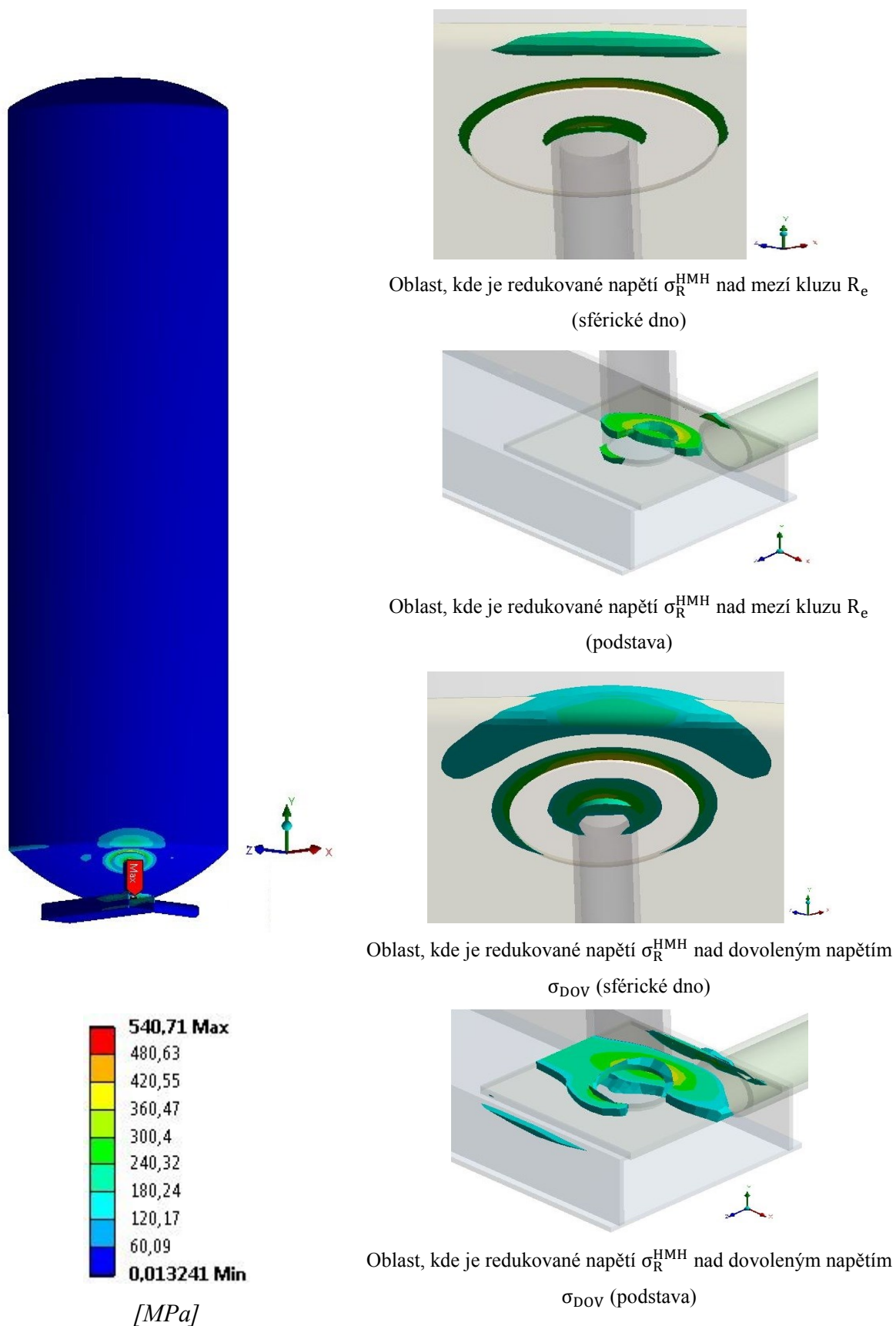
Obr. 30 Meridiánové napětí σ_m [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta A)



Obr. 31 Obvodové napětí σ_t [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta A)



Obr. 32 Posuv [mm] (konstrukční varianta A)



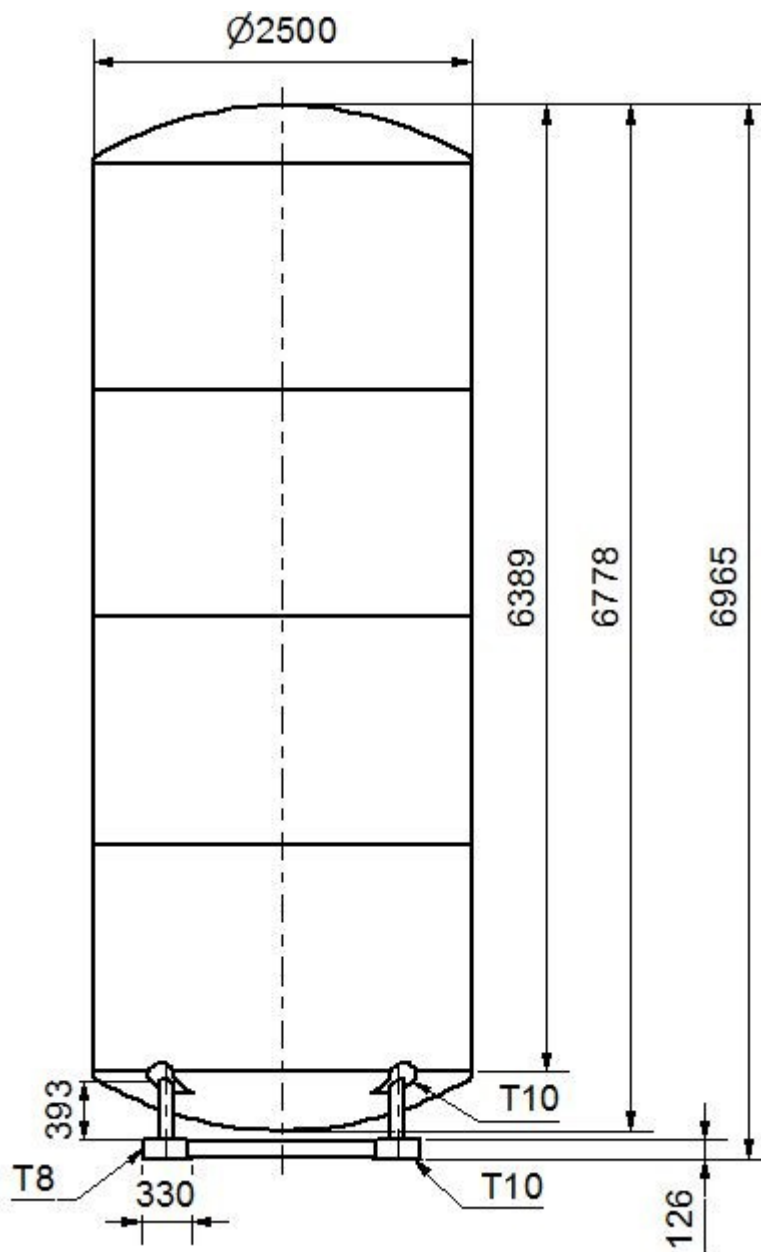
Obr. 33 Analýza redukovaného napětí σ_R^{HMH} [MPa] v místě sférického dna, stojiny a podstavy (konstrukční varianta A)

5.1.5. Dílčí závěr a zhodnocení

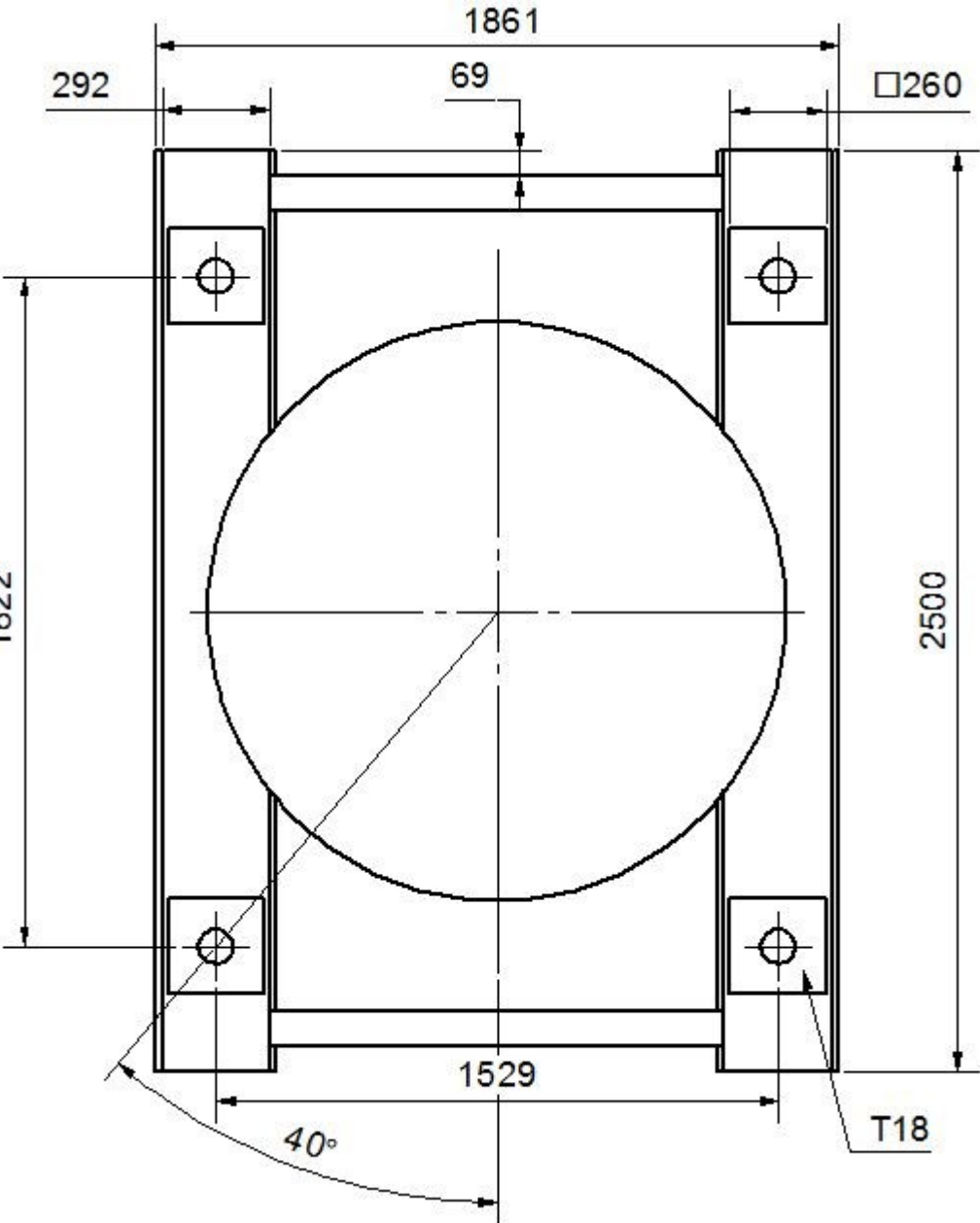
Z výsledků MKP analýzy je zřejmé, že konstrukční varianta A není vhodná pro provoz zásobníku. Největší redukované napětí mělo hodnotu $540,71 \text{ MPa}$ (viz. Obr. 29), což překračuje mez kluzu materiálu více než dvojnásobně. Dále lze usoudit, že kritická místa byla tam, kde se stojina stýkala s krycími plechy (na sférickém dně, na podstavě). V těchto místech vznikala napětí daleko převyšující mez kluzu materiálu (viz. Obr. 33). Meridiánové a obvodové napětí bylo největší v místě přechodu sférického dna na válcovou část pláště zásobníku nad stojinou (viz. Obr. 30 a Obr. 31). Největší posuv byl vyhodnocen na sférickém dně, a to téměř 4,4 mm (viz. Obr. 32).

5.2. Konstrukční varianta B

Tato varianta byla navržena s ohledem na výsledky a zjištěná kritická místa z konstrukční varianty A. Stojiny nebyly šikmé, nýbrž rovné. Krycí plechy nebyly umístěny pouze na sférickém dně, ale byly protaženy na válcovou část pláště zásobníku, také byl změněn jejich tvar. Dále byla zvětšena tloušťka krycího plechu na podstavě z 15 mm na 18 mm. Rozměry pláště zůstaly stejné včetně sférických částí. Další úpravy viz. Obr. 34 a Obr. 35.



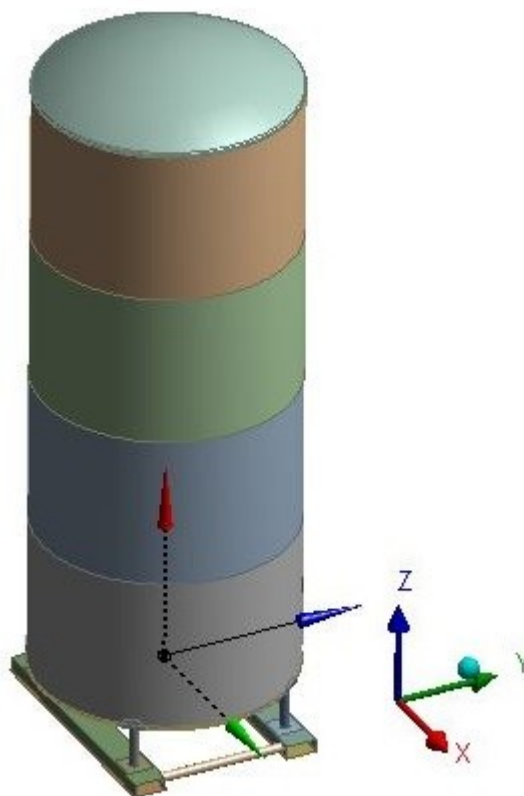
Obr. 34 Schéma s kótami konstrukční varianty B (pohled zepředu)



Obr. 35 Schéma podstavy s kótami konstrukční varianty B (pohled shora z částečného řezu)

5.2.1. Výpočtový model

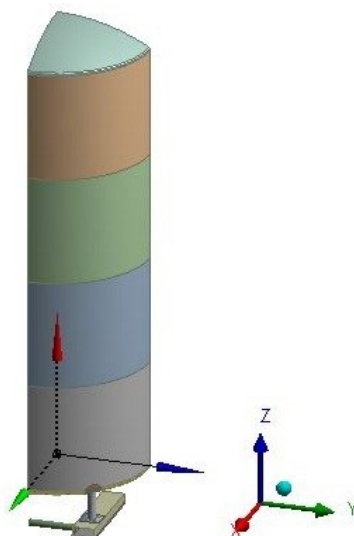
Model byl zkonstruován v plechovém 3D modeláři na základě schémat (Obr. 34 a Obr. 35). Poté byl importován do geometrického modeláře výpočtového softwaru a v něm mu byly přiřazeny tloušťky dle Obr. 10, Obr. 34 a Obr. 35. Parametry materiálu zásobníku viz. Tab. 1.



Obr. 36 Importovaná geometrie do výpočtového softwaru (konstrukční varianta B)

5.2.1.1. Symetrie

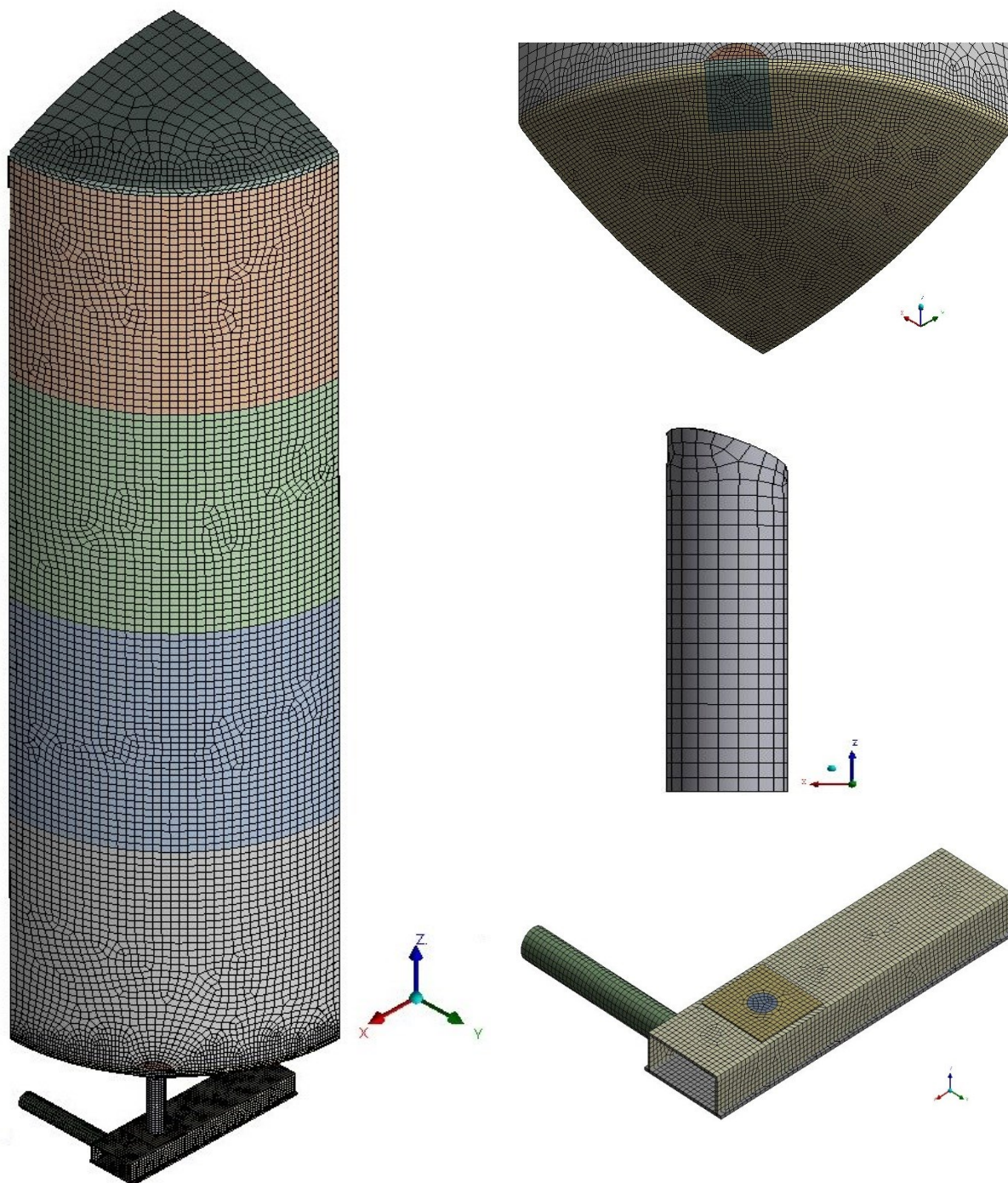
Zásobník byl řešen pomocí rovinné symetrie. Roviny symetrie byly XZ a YZ (viz. Obr. 36).



Obr. 37 Vzniklá geometrie při využití rovinné symetrie (konstrukční varianta B)

5.2.2. Sít'

Jak již bylo dříve popsáno v kapitole 4.3.2. , základní síť dostatečně neobsáhla geometrii zásobníku. Proto byly změněny velikosti elementů. Na válcové části pláště zásobníku byla zvolena velikost 48 mm . Na sférickém dně, stojině a podstavě byla zvolena velikost 16 mm . Sférické víko zůstalo beze změny. Typ prvku použitý pro MKP analýzu byl SHELL181 (více viz. kapitola 4.3.2.).



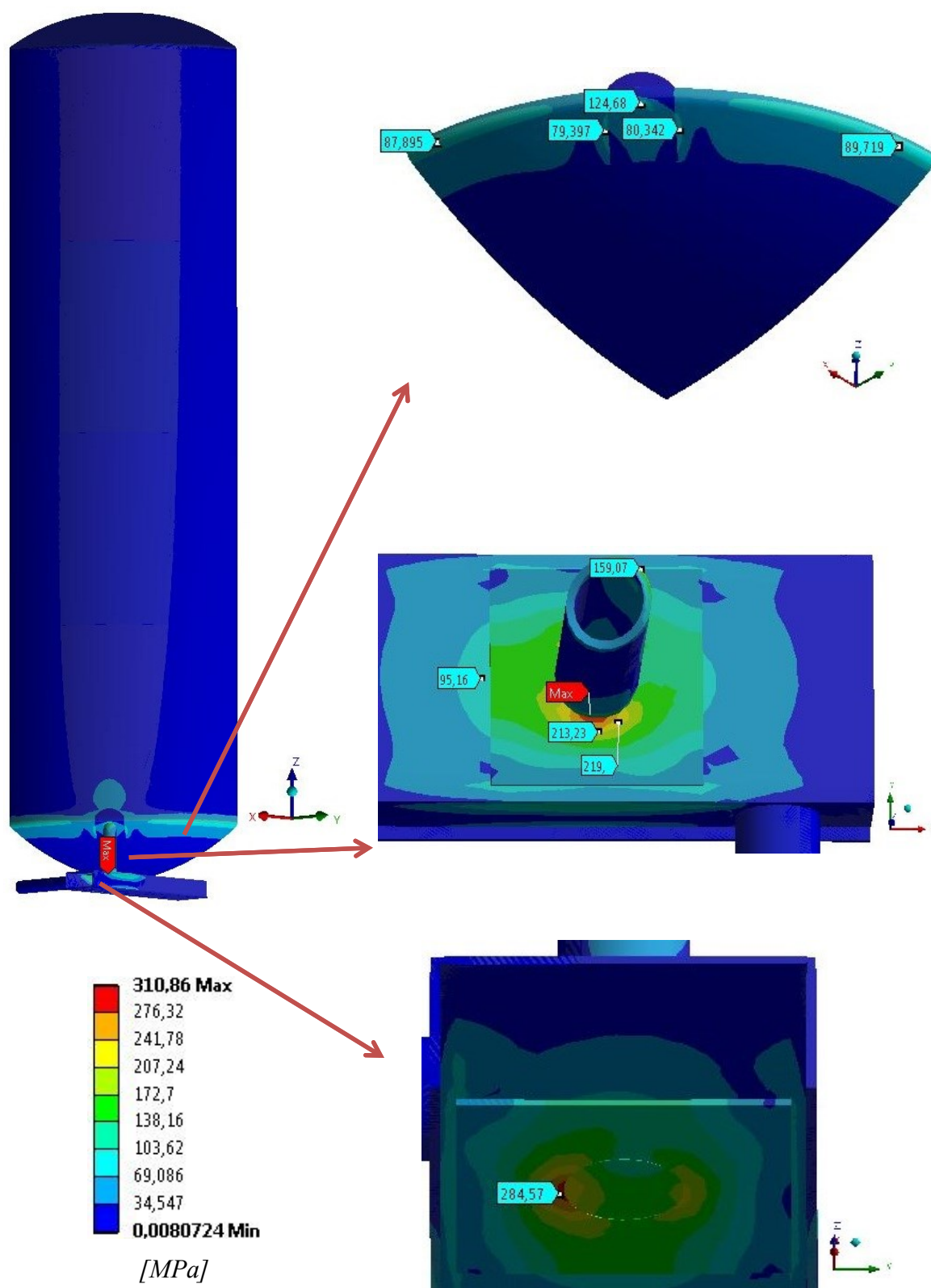
Obr. 38 Sít' vytvořená na sférickém dně, stojině a podstavě (konstrukční varianta B)

5.2.3. Okrajové podmínky

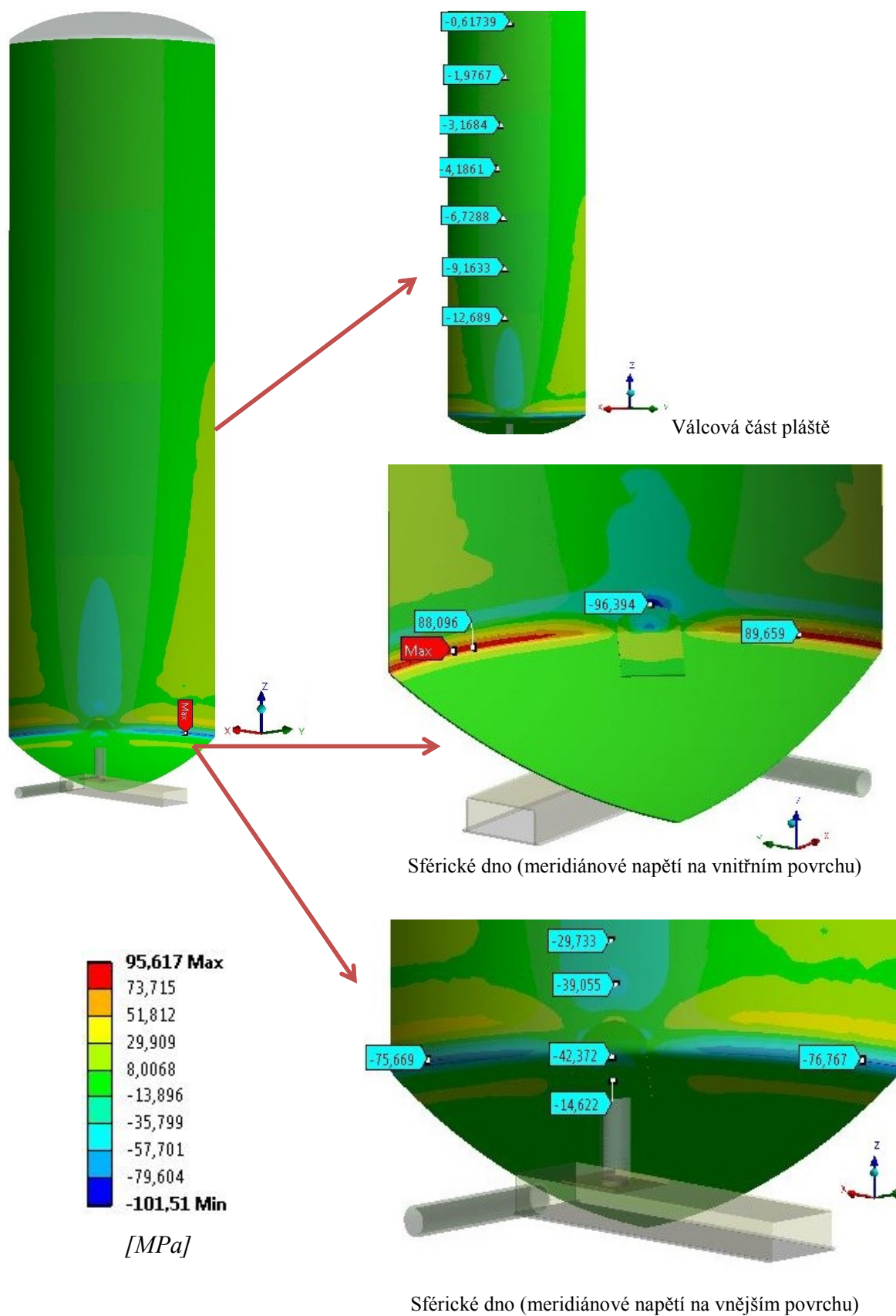
Geometrické okrajové podmínky byly totožné jako v kapitole 4.3.3. Rovinná symetrie podle rovin XZ a YZ. Tou druhou bylo zamezení posuvu v ose Z. Více viz. Obr. 15.

Hydrostatický tlak byl zadán jako strukturální okrajová podmínka (viz. kapitola 5.1.3.). Parametry hydrostatického tlaku byly uvedeny v Tab. 2. Pro jeho správné fungování bylo potřeba vytvořit nový souřadný systém. Tato okrajová podmínka byla zadána na vnitřní plochy válcové části pláště zásobníku a sférické dno (viz. Obr. 28).

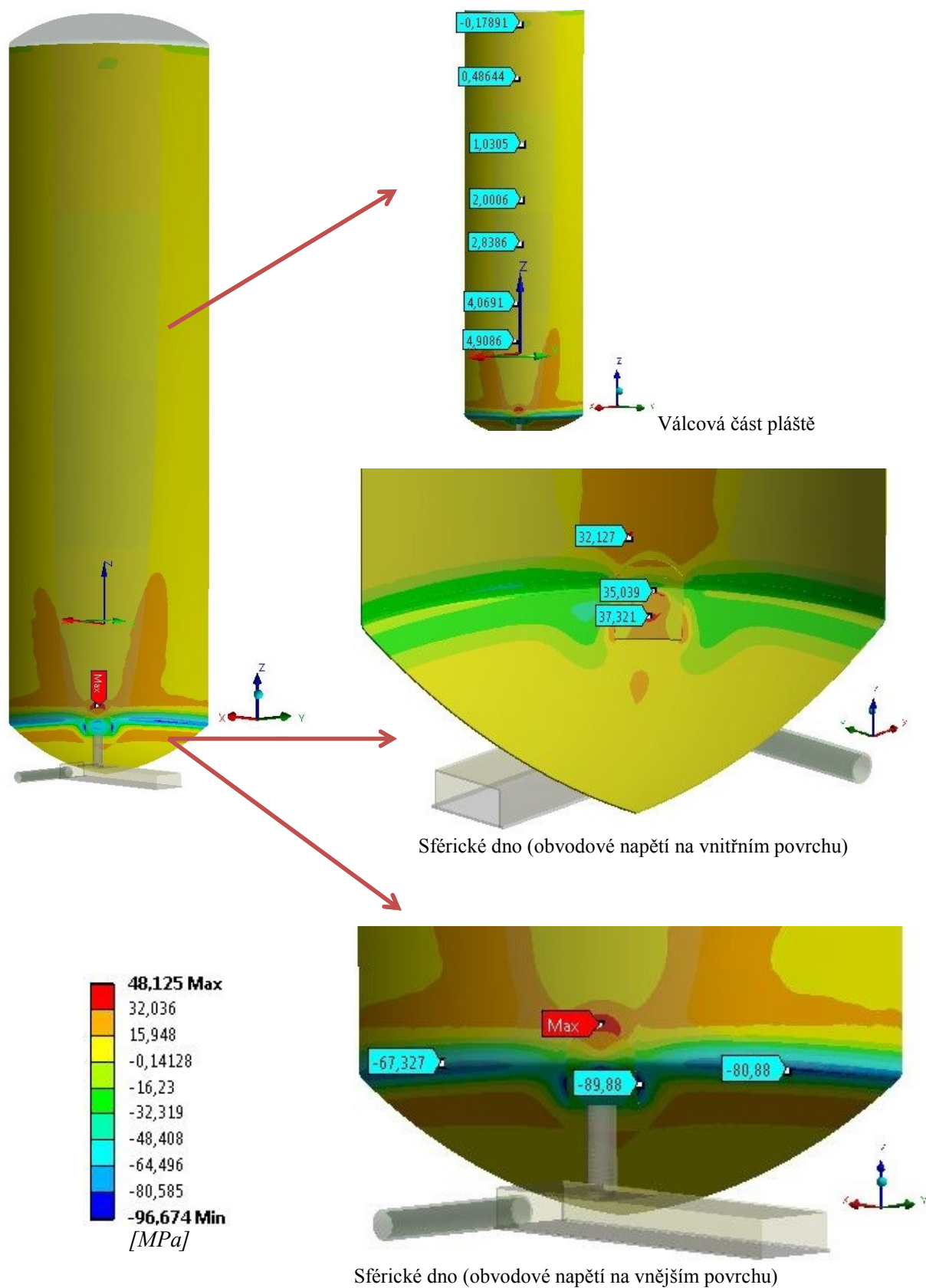
5.2.4. Získané výsledky



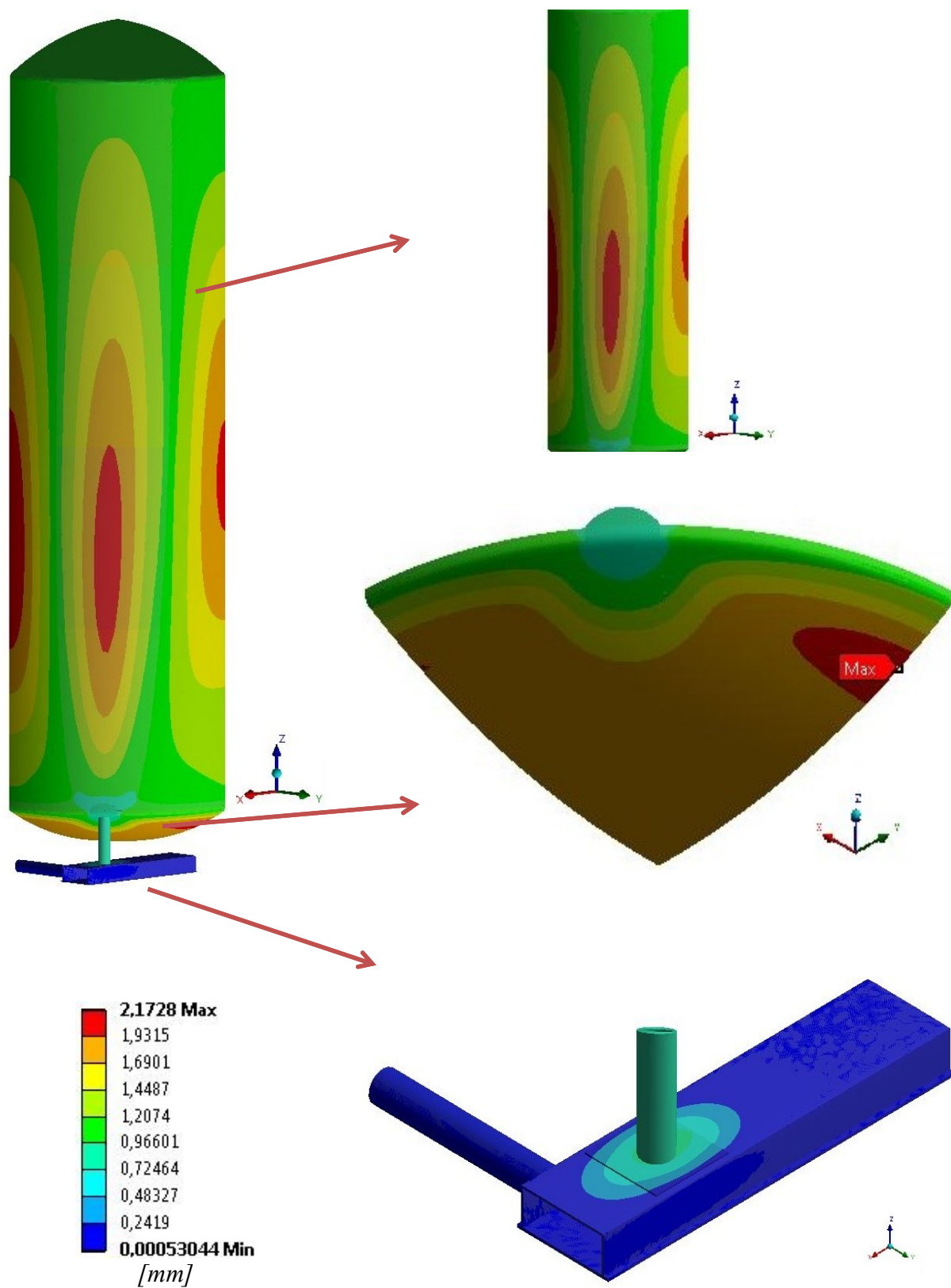
Obr. 39 Redukované napětí σ_R^{HMH} [MPa] v místě sférického dna, stojiny a podstavy (konstrukční varianta B)



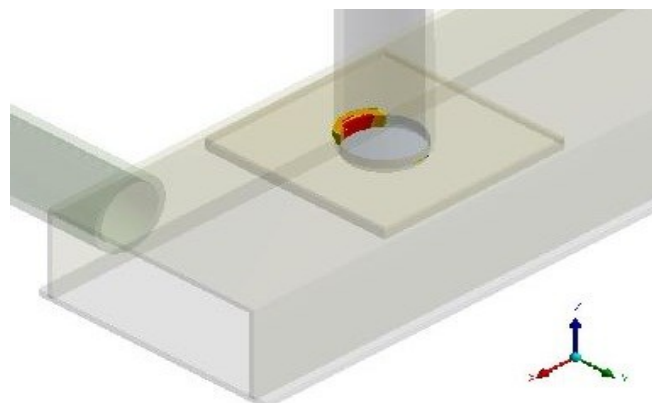
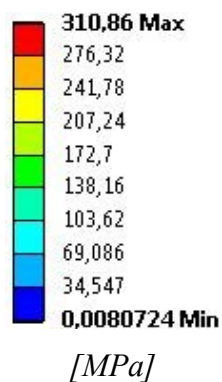
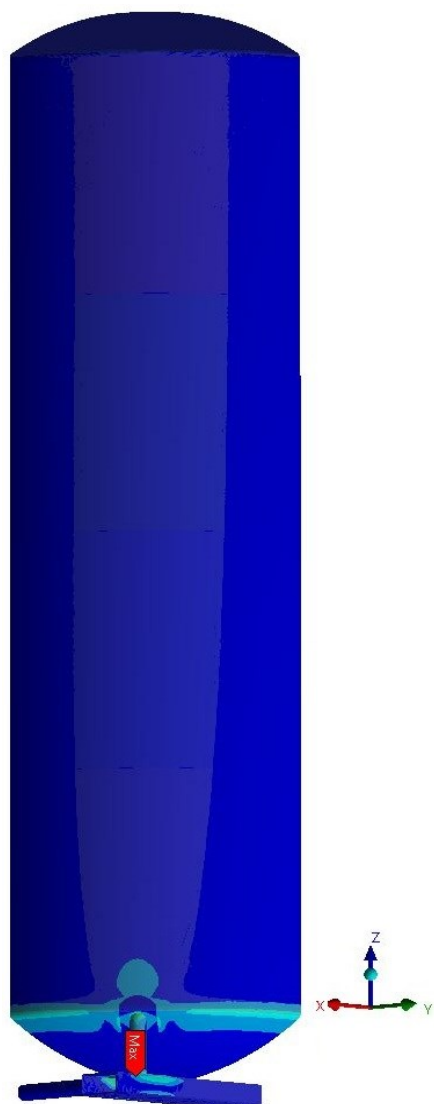
Obr. 40 Meridiánové napětí σ_m [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta B)



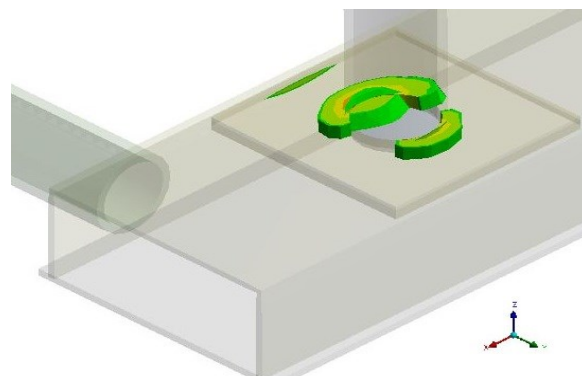
Obr. 41 Obvodové napětí σ_t [MPa] včetně sférického dna (konstrukční varianta B)



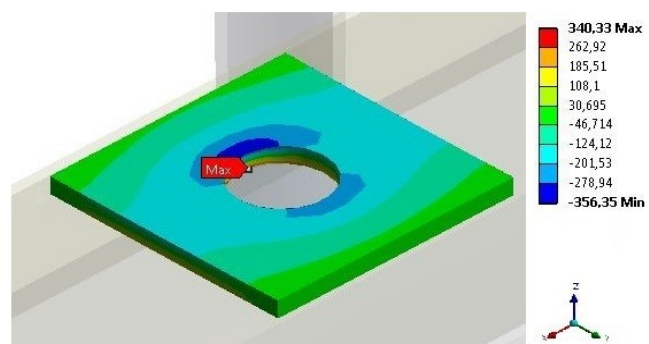
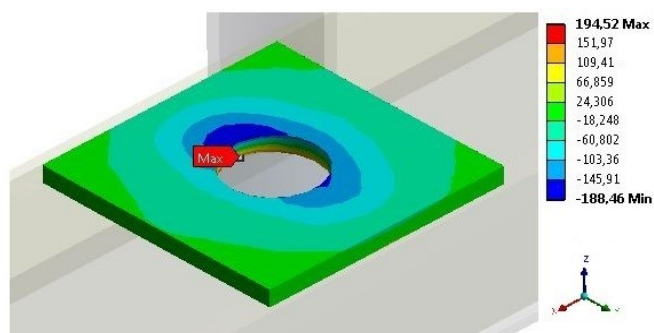
Obr. 42 Posuv [mm] (konstrukční varianta B)



Oblast, kde je redukované napětí σ_R^{HMH} nad mezí kluzu R_e



Oblast, kde je redukované napětí σ_R^{HMH} nad dovoleným napětím σ_{Dov}



Obr. 43 Analýza redukovaného napětí σ_R^{HMH} [MPa] v krycím plechu na podstavě

5.2.5. Dílčí závěr a zhodnocení

Z výsledků vyplynulo, že konstrukční varianta B je lepší ve všech ohledech než konstrukční varianta A. Maximální redukované napětí mělo hodnotu $310,86 \text{ MPa}$ (viz. Obr. 39). I když je tato hodnota o přibližně o 76 MPa vyšší než mez kluzu materiálu, není třeba se obávat, že by zásobník nemohl být provozován. Oblast, kde je redukované napětí nad mezí kluzu, je velmi malá (viz. Obr. 43). V této oblasti vzniká špičkové napětí způsobené ostrým přechodem dvou na sebe navazujících skořepinových prvků. Ve skutečnosti by stojina byla přivařena k podstavě pravděpodobně koutovým svarem, to by mělo za následek snížení redukovaného napětí. Krycí plech na podstavě je namáhán na ohyb. V ose X má maximální ohybové napětí (tahové) hodnotu $194,52 \text{ MPa}$ a je pod mezí kluzu materiálu (viz. Obr. 43). V ose Y má maximální ohybové napětí (tlakové) hodnotu $356,35 \text{ MPa}$ a je nad mezí kluzu materiálu (viz. Obr. 43). Dále byly sníženy hodnoty meridiánového a obvodového napětí. Posuv byl také snížen ze $4,4 \text{ mm}$ na $2,17 \text{ mm}$ (viz. Obr. 42).

Pokud by výrobci nestačila odůvodnění v předchozím odstavci k provozuschopnosti konstrukční varianty B, dalším doporučením by bylo namodelovat stojinu i s podstavou objemovými prvky. Nebo dodatečně navrhnout svarový přechod se zabroušením do rádiusu.

6. Závěr

Cíl práce byl splněn navržením tloušťky pláště zásobníku a vhodnou konstrukcí stojných nohou. Návrh tloušťek pláště zásobníku byl uskutečněn pomocí analytické metody, byly vypočítány hodnoty tloušťek pro dva případy uložení válcové části pláště zásobníku. Po zvolení tloušťek byly porovnány hodnoty napětí a bezpečností obou variant uložení válcové části pláště se skutečným uložením pláště zásobníku. Tím bylo zjištěno, zda bylo při návrhu postupováno správně. Při výpočtu skutečného uložení pláště byl zásobník nahrazen konečno-prvkovým modelem. Z dosažených výsledků (viz. kapitola 4.4.) lze usoudit, že tloušťky pláště zásobníku byly dostačující.

Při řešení konstrukčního návrhu stojných nohou byla užita metoda MKP. Byly vypočteny a zhodnoceny dvě konstrukční varianty stojných nohou. Přičemž konstrukční varianta A vycházela z původního návrhu poskytnutého výrobcem. Jako provozuschopnější a přijatelnější se však osvědčila konstrukční varianta B, která po analýze vykazovala daleko lepší výsledky (viz. kapitola 5.2.4.) ve všech ohledech než konstrukční varianta A.

Díky této práci jsem se naučil využít teorii pružnosti a pevnosti ve složitější praktické úloze. Celá práce obsahovala řadu problémů. Asi nejsložitějším problémem byl návrh správné tloušťky pláště zásobníku bez znalosti teorie tenkostěnných nádob zahrnující namáhání momenty. Protože nejprve bylo potřeba vytvořit si geometrický model v softwaru Inventor pro pozdější analýzu, zlepšily se mé schopnosti v oblasti 3D modelování. Zdokonalil jsem si i ovládání konečno-prvkového softwaru ANSYS např. úpravami geometrického modelu, zadáváním okrajových podmínek, úpravami sítě apod. Protože nebylo řešeno mnoho obdobných úloh a dohledávání prací s obdobnou tematikou bylo málo, naučil jsem se větší samostatnosti při řešení problému. Proto byla práce zajímavější a poučnější.

7. Citovaná literatura

1. **Wikipedia.** Silo. *Wikipedia - otevřená encyklopedie*. [Online] Wikipedia. [Citace: 20. 1 2013.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Silo>.
2. **Morava, Morkus.** <http://www.morkus-morava.cz/hutni-material/jakost-oel-s235jr-10038.html>. *Jakost S235JR*. [Online] Morkus Morava, 2010. [Citace: 5. 2 2013.] <http://www.morkus-morava.cz/hutni-material/jakost-oel-s235jr-10038.html>.
3. **Rojíček, Jaroslav.** Pružnost a pevnost v energetice (Návody do cvičení). *Cvičení 4 (Tenkostěnné a silnostěnné nádoby)*. [Online] 2009. [Citace: 10. 2 2013.] http://www.339.vsb.cz/PDF/PPE/4-Tenkostenne_a_silnostenne_nadoby.pdf.
4. **FUXA, Jan a Ludmila ADÁMKOVÁ.** *Sbírka příkladů z pružnosti a pevnosti II*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007-2008.
5. **bazenek.cz.** Nadzemní bazény Orlando s kovovou konstrukcí. *bazenek.cz*. [Online] bazenek.cz, 2013. [Citace: 7. 5 2013.] <http://bazenek.cz/katalog/nadzemni-bazeny-orlando-s-kovovou-konstrukci-127>.
6. **Fusek, Martin a Rojíček, Jaroslav.** *Podklady do předmětu MKP1 - Nekorigované*. [Dokument] Ostrava : Fusek, Martin; Rojíček, Jaroslav, 2006.
7. **Šrámek, Tomáš.** Příručka pro výuku: FINITE ELEMENT METHOD (FEM). *VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou*. [Online] 2009. [Citace: 10. 3 2013.] <http://www.spszr.cz/projekty/plm/fem2012.pdf>.
8. **ANSYS, Inc.** *ANSYS 14.0 Help*. [Dokument] místo neznámé : ANSYS, Inc., 2012.
9. **s.r.o., m-tec CZ.** Trasnportní silo. [Online] m-tec CZ s.r.o., 2013. [Citace: 10. 5 2013.] <http://www.silosystem.cz/cs/>.
10. **LTD., G.E. Silos PTY.** Grain Silos. [Online] G.E. Silos PTY. LTD. [Citace: 10. 5 2013.] <http://www.gesilos.com.au/grain.html>.